

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Komplexní analýza zavěšení výfukové soustavy do vozu včetně vlastního
návrhu technického řešení

Complex analysis of the exhaust system mountings into a car body
including proposal of own technical solution

Student:

Bc. Martin Piruch

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D

Ostrava 2020

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Piruch**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie

Specializace: 20 Silniční doprava

Téma: Komplexní analýza zavěšení výfukové soustavy do vozu včetně
vlastního návrhu technického řešení
Complex Analysis of Exhaust System Mountings into Car Body
Including Proposal of Own Technical Solution

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

Cílem diplomové práce je provést komplexní analýzu zavěšení výfukové soustavy vybraného vozidla a navrhnout vlastní konstrukční řešení zavěšení výfukové soustavy.

Osnova práce:

1. Úvod.
2. Definice nároků na zavěšení výfukové soustavy.
3. Teoretický rozbor současného stavu poznání v oblasti zavěšení výfukové soustavy automobilu.
4. Návrh vlastního konstrukčního řešení.
5. Validace konstrukčního řešení.
6. Zhodnocení a doporučení.
7. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- MACEK, Jan. Spalovací motory. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2012. 262 s. ISBN 978-80-01-05015-6.
- SCHÄFER, Edited by Richard van Basshuysen and Fred. Internal combustion engine handbook basics, components, systems, and perspectives. Warrendale, Pa: Society of Automotive Engineers, 2004. ISBN 978-076-8071-962.
- MARTYR, A. J.; PLINT, M. A., Engine testing theory and practice. 3. vyd. Oxford: Elsevier's Science & Technology, 2007. 442 s. ISBN-13: 978-0-7506-8439-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



prof. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

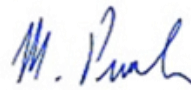


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 6.5.2020


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo,
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3),
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO,
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 6.5.2020


.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Martin Piruch

Adresa trvalého bydliště autora práce:

Horní Němčí 344, 687 64

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlu Dreslerovi, Ph.D. za odborné vedení této diplomové práce. Za odbornou konzultaci při vypracování této diplomové práce děkuji panu Ing. Matěji Řehánkovi a panu Bc. Radku Hošínskému. Velké díky patří také panu Ing. Janu Sýkorovi za odbornou konzultaci při provádění pevnostních výpočtů a vyhodnocení bezpečnosti navrženého konstrukčního řešení zadního závěsu výfukové soustavy.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PIRUCH, M. *Komplexní analýza zavěšení výfukové soustavy do vozu včetně vlastního návrhu technického řešení : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2020, 76 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá problematikou zavěšení výfukové soustavy do vozidla. První část práce je věnována seznámením se se složením výfukové soustavy a teoretickému rozboru současného stavu oblasti zavěšení výfukové soustavy. Následuje definice nároků na zavěšení výfukové soustavy do vozu a rozbor zavěšení výfukové soustavy na vybraném voze. V další kapitole je z několika návrhů konstrukčního řešení zadního závěsu výfukové soustavy vybráno to, které nejlépe splňuje požadovaná specifika. Další částí práce je virtuální ověření bezpečnosti vybraného konstrukčního řešení zadního závěsu výfukové soustavy na základě normovaných životnostních zkoušek. Nakonec jsou vyhodnoceny výsledky výpočtů a je zhodnoceno nasazení navrženého závěsu na reálném voze.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

PIRUCH, M. *Complex analysis of the exhaust system mountings into a car body including proposal of own technical solution : Master Thesis*. Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, The Institute of Transport, 2020, 76 p. Thesis head: doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.

Master thesis is dealing with a mounting of exhaust system into a car body. In the first part are described components of exhaust system and presented today's knowledges about exhaust system mounting. Next part is definition of requirements, that exhaust system has to meet. An analysis of exhaust system mounting is the topic of the next chapter and focuses on a chosen car. Proceeding this, design proposals of the rear exhaust hanger are introduced as well as the technical solutions which meet all specific requirements. The next topic is a virtual evaluation of the chosen technical solution. At the end of the thesis, results of validation are introduced suggesting technical solutions to the rear exhaust hanger and the possibility of using this hanger in a real vehicle is evaluated.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	9
Úvod	11
1 Teoretický rozbor současného stavu poznání v oblasti zavěšení výfukové soustavy	12
1.1 Funkce a složení výfukové soustavy	12
1.2 Zavěšení výfukové soustavy	19
2 Definice nároků na zavěšení výfukové soustavy	30
2.1 Spolehlivost	30
2.2 Tuhost pružných závěsů	31
2.3 Náročnost montáže	32
2.4 Udržovatelnost	32
2.5 Cena	33
3 Analýza zavěšení výfukové soustavy u vybraného vozu	34
3.1 Pevné připojení přední části výfuku k motoru	34
3.2 První pružný závěs	35
3.3 Druhý pružný závěs	37
3.4 Třetí pružný závěs	38
4 Návrh vlastního konstrukčního řešení	39
4.1 Posuzované parametry závěsu a definice jejich hodnocení	39
4.2 Návrh konceptů závěsu	43
4.3 Výběr konstrukčního řešení zadního závěsu	50
5 Validace konstrukčního řešení	53
5.1 Vstupy pro výpočet pevnosti závěsu	54
5.2 Výpočet pevnosti navrženého závěsu	59
6 Zhodnocení a doporučení	64
6.1 Vyhodnocení bezpečnosti závěsu varianta 4	65
6.2 Vyhodnocení bezpečnosti závěsu se zkrácenými svary	69
6.3 Dynamická obálka	73
6.4 Doporučení	73
Závěr	74
Použité informační zdroje	76

Seznam použitých značek a symbolů

Latinské symboly

G	[-]	Geometrický průměr vah parametrů
P	[J]	Potenciální energie vnějšího zatížení
V_i	[-]	Normativní váha parametru
W	[J]	Energie napjatosti
g	[m·s ⁻²]	Tíhové zrychlení
o		Sloupcová matice objemového zatížení
o_x	[N·mm ⁻³]	Objemové zatížení ve směru x
o_y	[N·mm ⁻³]	Objemové zatížení ve směru y
o_z	[N·mm ⁻³]	Objemové zatížení ve směru z
p		Sloupcová matice plošného zatížení
p_x	[N·mm ⁻²]	Plošné zatížení ve směru x
p_y	[N·mm ⁻²]	Plošné zatížení ve směru y
p_z	[N·mm ⁻²]	Plošné zatížení ve směru z
u^T		Sloupcová matice posuvů
u	[mm]	Posuv ve směru x
v	[mm]	Posuv ve směru y
w	[mm]	Posuv ve směru y
x_n	[-]	Váha parametru

Řecké symboly

Γ_p		Index představující okolí tělesa
Π	[J]	Potenciální energie
Ω_t		Index představující těleso
γ_{xy}	[-]	Zkos v rovině xy
γ_{yz}	[-]	Zkos v rovině yz
γ_{zx}	[-]	Zkos v rovině zx
ε		Sloupcová matice přetvoření
ε_x	[-]	Přetvoření ve směru x
ε_y	[-]	Přetvoření ve směru y

ε_z	[-]	Přetvoření ve směru z
σ^T		Sloupcová matice napětí
σ_x	[MPa]	Napětí ve směru x
σ_y	[MPa]	Napětí ve směru y
σ_z	[MPa]	Napětí ve směru z
τ_{xy}	[MPa]	Smykové napětí v rovině xy
τ_{yz}	[MPa]	Smykové napětí v rovině yz
τ_{zx}	[MPa]	Smykové napětí v rovině zx

Zkratky

GPF	Gasoline particulate filter
DPF	Diesel particulate filter
EPDM	Etylen-Propylen-Dienový-Kaučuk

Úvod

V posledních letech je trend vývoje legislativních požadavků kladených na automobily především ve znamení zpřísnování emisních a hlukových limitů. Kvůli tomu prochází výfuková soustava, jejíž funkcí je snížit množství škodlivin obsažených ve výfukových plynech a hladinu hluku vznikajícího prací spalovacího motoru, rychlým technickým vývojem a zdokonalováním. Mění se konstrukce výfukové soustavy a zástavby podvozkové části vozidel spolu s dalšími požadavky výrobců ovlivňují konstrukci závěsů a držáků výfukové soustavy. V první části této diplomové práce je proto čtenář seznámen s aktuálními komponenty používanými ve výfukové soustavě pro splnění legislativních požadavků rozčleněnými do funkčních celků, s rozбором konstrukce závěsů a držáků výfukové soustavy a s definicí nároků kladených na závěsy výfukové soustavy. Závěrem první části práce je analýza zavěšení výfukové soustavy na konkrétním voze.

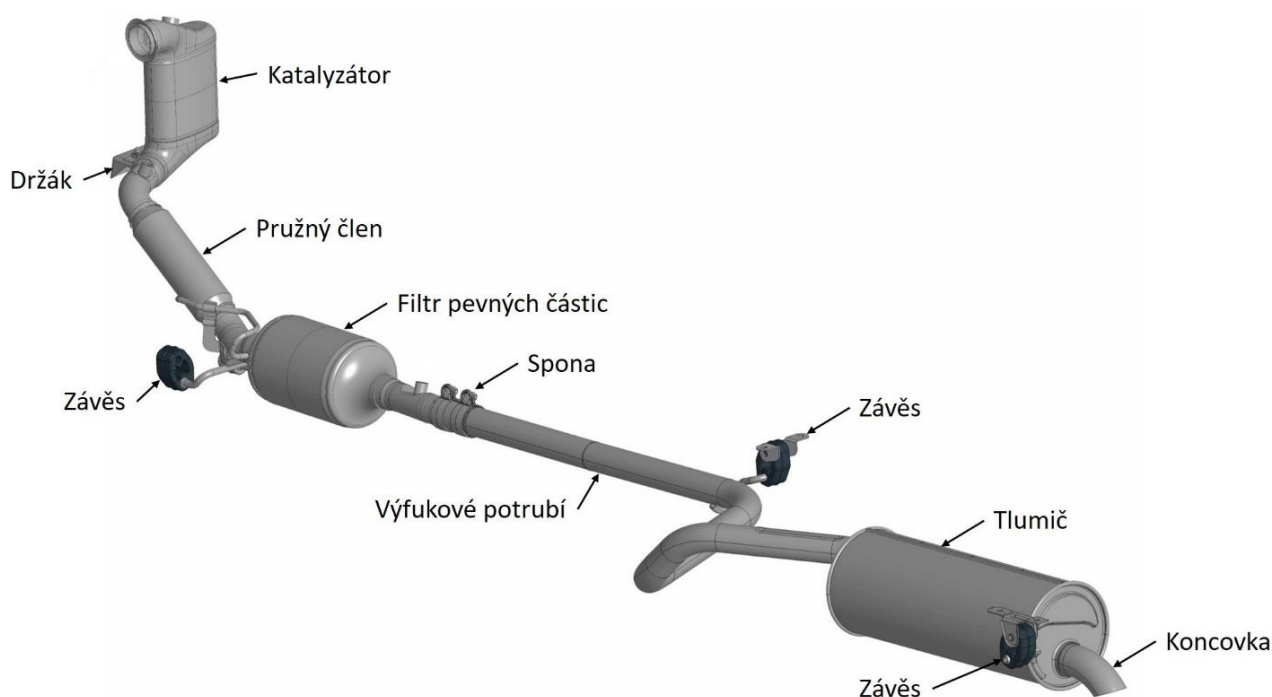
Druhá část práce pojednává o návrhu konstrukčního řešení zadního závěsu, což je hlavním cílem této práce. Navrhovaný závěs má být umístěn v zadní části vozu v oblasti zadního tlumiče a koncovky výfukové soustavy. Jedná se tedy o poslední pružný závěs výfukové soustavy. Závěs musí splnit nejen požadavky dané zástavbovými možnostmi vozu v oblasti umístění závěsu, ale také všechny okrajové podmínky vyplývající z podmínek trhu plánovaného nasazení vozu. Čtenář je nejdříve seznámen s návrhy možných konstrukčních řešení zadního závěsu, u kterých jsou zhodnoceny jejich hlavní parametry. Po výběru nejvhodnějšího konstrukčního řešení se práce věnuje virtuální validaci bezpečnosti závěsu v reálném provozu, vztažené k normovaným životnostním zkouškám. Na základě výsledků výpočtů je zhodnocena možnost nasazení navrženého konstrukčního řešení zadního závěsu výfukové soustavy v reálném provozu.

1 Teoretický rozbor současného stavu poznání v oblasti zavěšení výfukové soustavy

Výfuková soustava prošla při vývoji automobilu dlouhým vývojem a zdokonalováním. Původně jednoduchá soustava, která měla za úkol pouze odvést výfukové plyny od motoru mimo kabinu automobilu, má v současnosti zásadní význam při plnění přísných legislativních požadavků a předpisů. Splnění legislativních požadavků je podmínkou pro schválení způsobilosti provozu daného vozidla na pozemních komunikacích. Změny konstrukce výfukové soustavy, spolu se vzrůstajícími nároky na výbavu a komfort vozu, mají také dopad na zdokonalení konstrukce, zlepšení funkce a zvýšení kvality závěsů a držáků výfukové soustavy.

1.1 Funkce a složení výfukové soustavy

Výfuková soustava (obr. 1.1) plní tři základní funkce: vede výfukové spaliny od motoru, zabraňuje jejich vniknutí do kabinového prostoru, přeměňuje a čistí výfukové plyny pro splnění emisních limitů a tlumí hluk vznikající prací spalovacího motoru pro splnění akustických limitů a zvýšení komfortu posádky. Skládá se z několika základních komponentů, které tyto funkce plní. [4]



Obr. 1.1: Výfuková soustava automobilu [1]

Konstrukci výfukové soustavy a nasazení určitého technického řešení ovlivňuje několik faktorů, především motorizace, konstrukce karoserie a okolní zástavby podvozkové části daného vozu. Emisní normy ovlivňují rozměry, parametry, počet použitých katalyzátorů či filtrů pevných částic a hlukové limity mají dopad na konstrukci tlumičů hluku. Významný vliv na konstrukci výfukové soustavy má také cena použitých komponentů, spolehlivost, montážní náročnost a udržitelnost.

1.1.1 Přeměna a čištění výfukových plynů

Výfuková soustava má díky katalyzátorům a filtrům pevných částic zásadní význam při přeměně a čištění výfukových plynů, jakožto produktů spalování zápalné směsi ve spalovacím motoru. Díky této funkci je významně sníženo množství škodlivin vypouštěných do ovzduší, jejichž maximální hodnoty jsou určeny emisními limity danými zákonem.

Katalyzátor

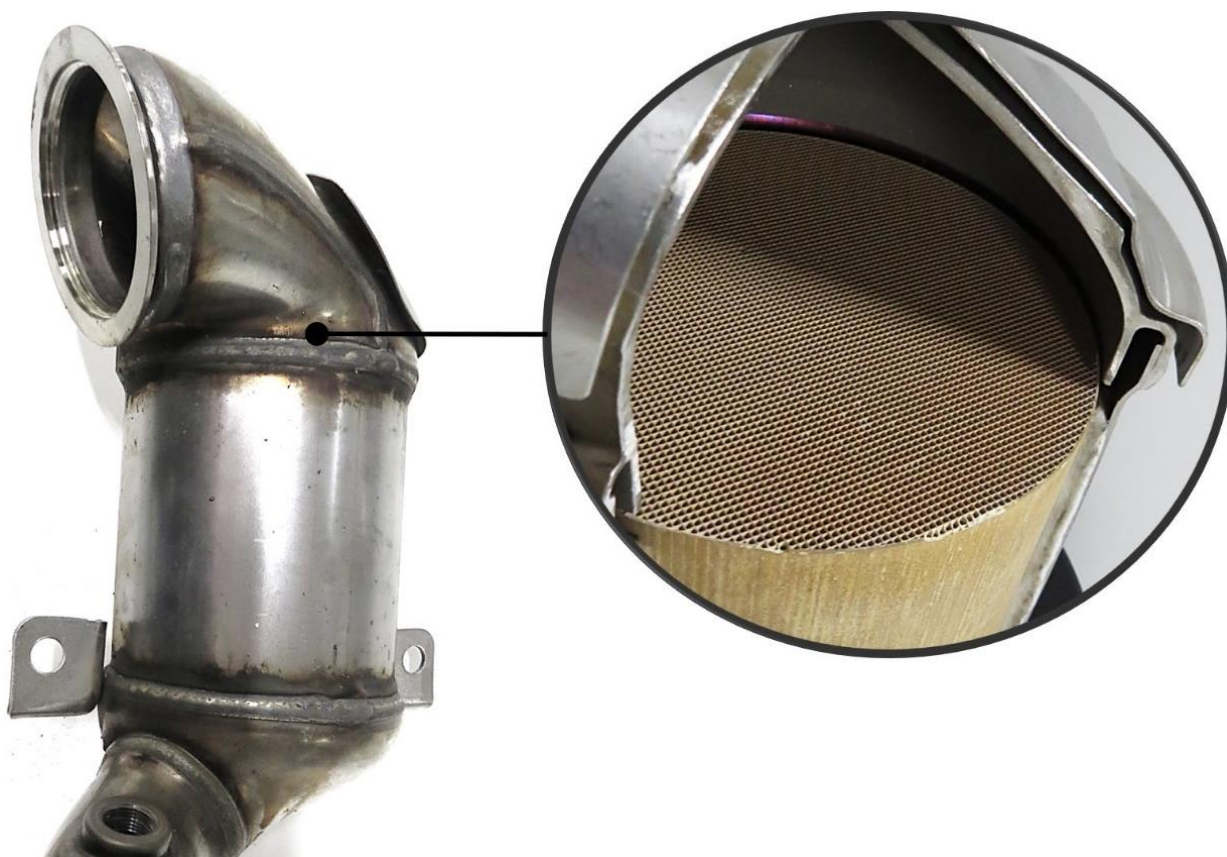
Katalyzátor nebo též katalytický konvertor je komponent, v němž katalytickou reakcí probíhá přeměna toxických výfukových plynů na méně škodlivé látky. Za přítomnosti reakčního činidla, v případě katalyzátorů drahých kovů (platiny, paladia a rhodia) a vysoké teploty je vyvolána přeměna emisí CO, HC a NO_x na méně škodlivé látky běžně obsažené v ovzduší. Samotné drahé kovy vycházejí z reakce nezměněny. Škodlivé emise vznikají nedokonalostmi při přípravě směsi paliva se vzduchem a při jejím spalování. Aby se katalyzátor rychle prohřál na teplotu, při které probíhá katalytická reakce, je zpravidla umístován blízko motoru. Existují tři základní typy katalyzátorů: [3],[4]

Třícestný katalyzátor – jedná se o nejdéle používaný typ katalyzátoru, jelikož likviduje všechny tři hlavní skupiny škodlivin. Probíhají v něm oxidační i redukční reakce, kdy jsou emise CO, HC a NO_x přeměňovány na N₂, CO₂ a H₂O. Správná funkce třícestného katalyzátoru je zajištěna, pouze pokud je složení směsi blízké stechiometrické hodnotě (součinitel přebytku vzduchu $\lambda=1$). Poměr množství paliva se vzduchem v zápalné směsi je řízen pomocí lambda sondy umístěné před katalyzátorem, která jej neustále upravuje na hodnotu blížící se $\lambda=1$. Díky tomu je možno třícestný katalyzátor označit za řízený. [3],[4]

Oxidační katalyzátor – nebo také dvoucestný, pracuje s chudou zápalnou směsí, tedy s přebytkem vzduchu. Oxidační reakce probíhá na principu dodávání kyslíku sloučeninám emisí CO a HC a přeměňuje je na CO₂ a H₂O. Oxidační katalyzátor se používá u vznětových motorů. [3],[4]

Redukční katalyzátor – redukční reakce probíhá na principu odebrání kyslíku sloučeninám a přeměňuje NO_x na N_2 . Používají se u motorů s přímým vstřikováním. [3],[4]

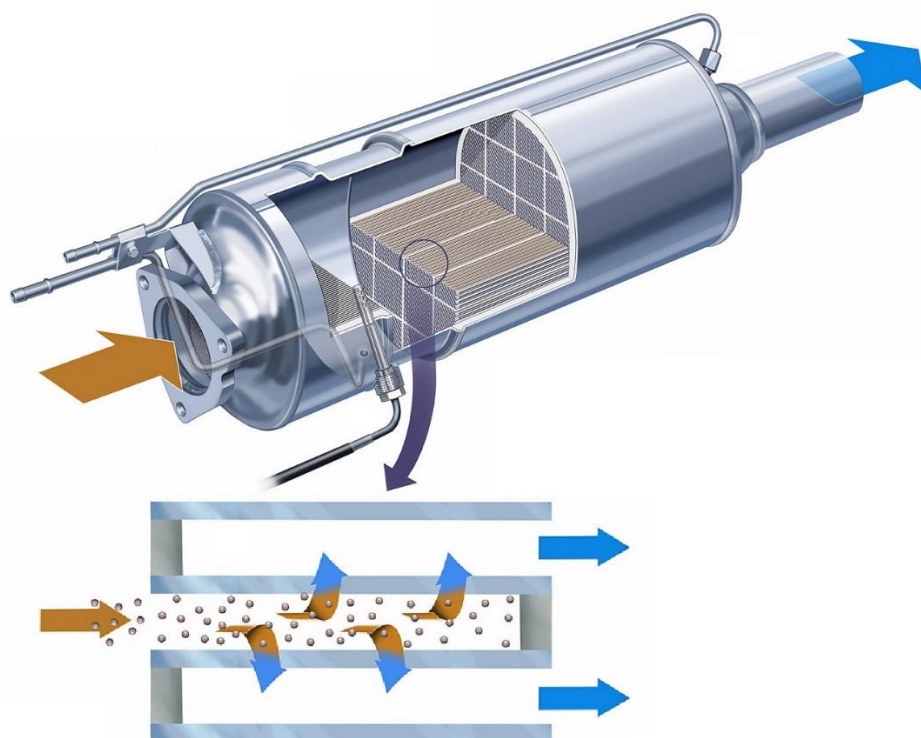
Funkčním jádrem katalyzátoru je substrát (obr. 1.2) – keramický nebo kovový nosič nejčastěji tvaru válce s velkým množstvím podélných průchozích kanálků. Substrát je povlakovaný drahými kovy a stěny kanálků zajišťují velkou styčnou plochu s výfukovými plyny. Substrát je uzavřený v kovovém obalu ohraničeném vstupním a výstupním kuželem zajišťujícím rovnoměrné rozložení proudu výfukových plynů na celý průřez substrátu. Mezi substrát a obal se umísťuje izolační vložka zabráňující mechanickému poškození křehkého keramického substrátu vlivem vibrací. [3],[4]



Obr. 1.2: Katalyzátor a detail substrátu [1]

Filtr pevných částic

Filtry pevných částic slouží k zachytávání pevných částic uhlíku vznikajících nedokonalým spálením paliva při nedostatku vzduchu. Pevné částice svým usazováním v plicních sklípcích způsobují lidem vážné zdravotní problémy. Úkolem filtrů pevných částic je proto pohltit až 99 % pevných částic o velikosti 10 – 500 nm obsažených ve výfukových plynech. Funkční jádro filtru tvoří nejčastěji keramický blok podobný tomu katalyzátorovému. Kanálky jsou však střídavě na začátku a na konci zaslepeny (obr. 1.3) a jejich stěny jsou pórovité. Výfukové plyny prostupují skrze pórovitou stěnu, přičemž jsou pevné částice zachyceny na povrchu stěn a v pórech. Dříve se filtry pevných částic používaly převážně u vznětových motorů, známé pod zkratkou DPF – diesel particulate filter. Nástup zážehových motorů s přímým vstřikováním paliva a zavedení přísných exhalačních limitů si vyžádal nutnost používat filtry pevných částic také u zážehových motorů (GPF – gasoline particulate filter). [6]



Obr. 1.3: Princip funkce filtru pevných částic [12]

1.1.2 Tlumení hluku

Výfuková soustava díky tlumičům hluku snižuje hluk vznikající prací spalovacího motoru nesoucí se spolu s proudem plynů výfukovou soustavou. Zajišťuje také požadovaný akustický projev, např. sportovní zvuk u sportovních vozů. Díky snížení hluku je zvýšen komfort posádky

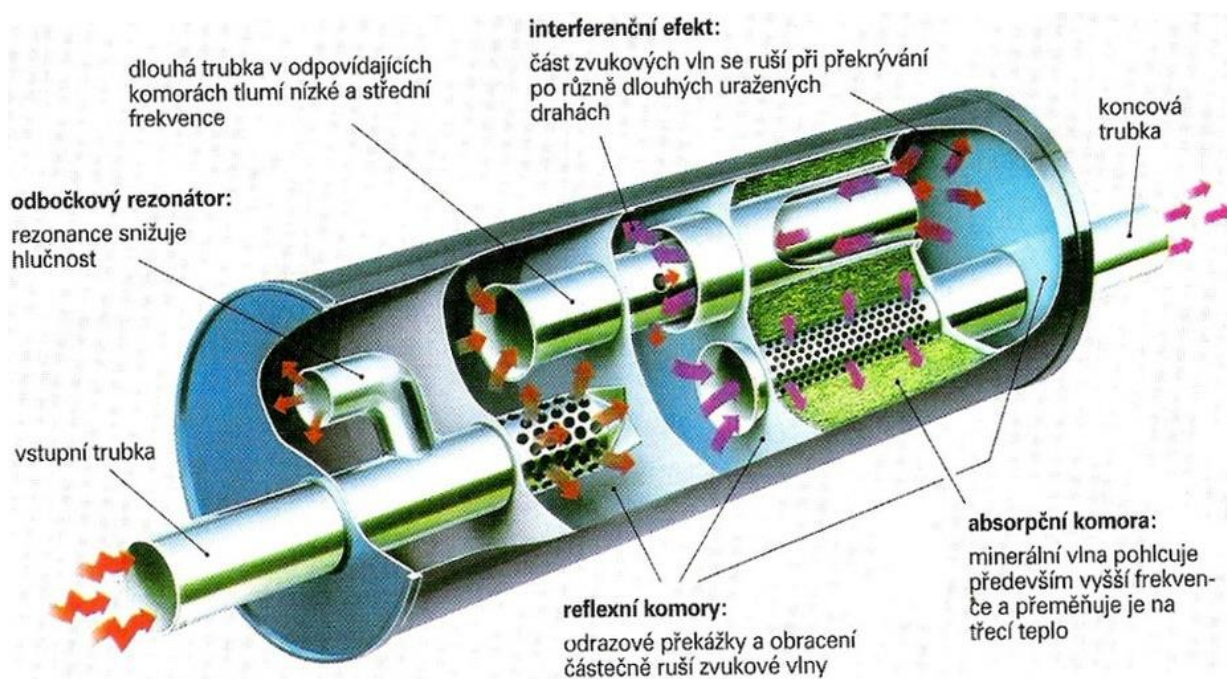
a zajištěno splnění legislativních požadavků stanovujících maximální hladinu hluku. Moderním prvkem výfukových soustav je použití výfukových klapek upravujících zvukový projev výfukové soustavy při různých jízdních režimech.

Tlumiče hluku

Podle principu tlumení hluku se tlumiče dělí na absorpční, rezonanční nebo jejich kombinaci:

Absorpční tlumič – komora absorpčního tlumiče je vyplněna absorpčním materiálem, např. minerální vlnou. Skrze tlumič prochází perforovaná trubka vedoucí výfukové plyny. Zvukové vlny díky otvorům v trubce prostupují do absorpčního materiálu, kde se jejich energie vlivem tření přeměňuje na teplo, zatímco výfukové plyny projdou tlumičem bez většího odporu. Proto se tento typ tlumiče používá u výfukových soustav s požadavkem na nízkou hodnotu protitlaku. Absorpční tlumiče tlumí zvuky o vysoké frekvenci. [3],[4]

Rezonanční tlumič – vnitřní stavba rezonančního tlumiče se skládá ze soustavy vzájemně propojených komor a trubek přesných rozměrů. Princip tlumení je založen na vzájemném vyrušení, tzv. interferenci zvukových vln, které jsou odraženy od stěn tlumiče a jejichž směr šíření je obrácen pomocí trubek. Rezonanční tlumiče účinně tlumí zvuky o nízké frekvenci. [4]



Obr. 1.4: Vnitřní stavba kombinovaného tlumiče [10]

Kombinovaný tlumič – spojením obou principů tlumení do jednoho tlumiče vznikne kombinovaný neboli rezonančně-absorpční tlumič. Jeho výhodou je schopnost tlumit široký rozsah frekvencí zvuku. Jeho větší rozměry v porovnání s předchozími typy si však žádají zástavbově větší prostor. Vnitřní stavba kombinovaného tlumiče je zobrazena na obr. 1.4. [4]

1.1.3 Vedení výfukových plynů a zavěšení výfukové soustavy

Výfuková soustava zajišťuje odvod spalín od motoru. Svou těsností a vyústěním mimo vůz zabraňuje vniknutí výfukových plynů do prostoru kabiny a možnému poškození komponentů v okolí výfuku kontaktem s horkými výfukovými plyny. Proto všechny spoje i samotné komponenty výfukové soustavy musí být dostatečně těsné. Snahou je optimalizovat konstrukci celé výfukové soustavy tak, aby kladla proudu plynů minimální odpor, což přispívá ke zvýšení výkonu motoru. [4]

Výfukové potrubí

Výfukové plyny jsou vedeny ve výfukovém potrubí. Potrubí je trasováno tak, aby nedošlo ke kolizi výfukové soustavy s některým z komponentů podvozku nebo karoserie. Potrubí je většinou kruhového průřezu, v případě potřeby většího odstupu od některých komponentů podvozku může mít oválný průřez. Výfukové potrubí propojuje komponenty pro čištění výfukových plynů a tlumení hluku v celek výfukové soustavy (obr. 1.1). Komponenty jsou s potrubím většinou pevně svařeny. V případě nutnosti vytvoření rozebíratelného spoje se používá spona, či příruba dotažená šrouby. [4]

Sběrné potrubí

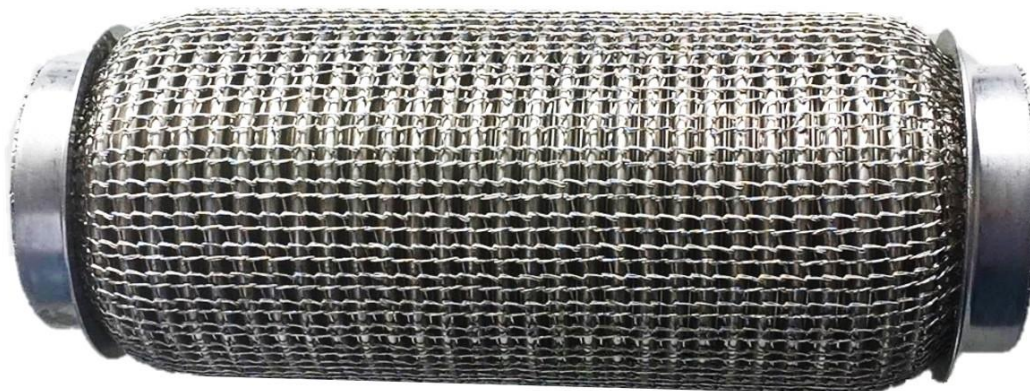
Sběrné potrubí slouží ke svedení výfukových plynů vystupujících z jednotlivých válců motoru do jednoho kanálu. Připevňuje se pomocí šroubů na hlavu motoru. Délkové naladění jednotlivých větví sběrného potrubí využívá vhodné tlakové pulzace ke zlepšení odvodu spalín z válce, čímž pomáhá ke zvýšení výkonu motoru. U moderních spalovacích motorů je často sběrné potrubí integrováno do hlavy motoru v podobě kanálků. Výstupem z hlavy motoru je v tomto případě jeden výfukový kanál. Příklad sběrného potrubí je na obrázku obr. 1.5. [2]



Obr. 1.5: Sběrné potrubí tříválcového motoru [1]

Vlnovec

Vlnovec (obr. 1.6) je pružný článek umístěný v přední části výfukové soustavy mezi pevně uchycenou a pružně zavěšenou částí výfuku. Část pevně uchycená k motoru je rozkmitána od vibrací motoru, zatímco část pružně zavěšená ke karoserii vozu je rozpohybována od pohybů karoserie při jízdě. Úkolem vlnovce je tyto nesynchronizované pohyby obou částí výfukové soustavy od sebe izolovat.



Obr. 1.6: Vlnovec [1]

Koncovky výfuku

Výfuková soustava je zakončena koncovkou, či koncovkami. Funkcí tvaru koncovek je zajistit požadovaný směr výfukových plynů vystupujících z výfukové soustavy. Snahou je především odklonit proud plynů od okolních komponentů a předejít tak jejich poškození vlivem působení horkých výfukových plynů. Směr proudu plynů je také často definován legislativou. Koncovky mají vliv na estetiku vozu, a to jak ozdobné koncovky (obr. 1.7), tak skryté.



Obr. 1.7: Příklad ozdobné koncovky [1]

Závěsy a držáky výfukové soustavy

Výfuková soustava je ke karoserii, okolním komponentům a k motoru připevněna pomocí držáků a závěsů. Ty musí zaručit spolehlivé uchycení výfukové soustavy, umožnit její správnou funkci a zamezit přenosu vibrací od výfukové soustavy do karoserie.

Protože je problematika zavěšení výfukové soustavy hlavním tématem této práce, bude se práce dále zabývat pouze závěsy a držáky výfukové soustavy, nikoliv výfukovou soustavou jako takovou. Specifikace konstrukce závěsů a držáků výfukové soustavy je podrobně popsána v následující kapitole 1.2.

1.2 Zavěšení výfukové soustavy

Výfuková soustava je připevněna pomocí držáků a zavěšena pomocí závěsů (příklad závěsu je na obr. 1.8). Držáky slouží k pevnému uchycení přední části výfuku před vlnovcem k motoru. Závěsy slouží k pružnému zavěšení výfukové soustavy za vlnovcem k nosné části automobilu (karoserii) nebo okolním komponentům. Konstrukční řešení závěsů a držáků výfukové soustavy ovlivňuje mnoho okrajových podmínek, z nichž největší význam mají: konstrukce výfukové soustavy, karoserie a podvozkové části vozu a dále specifickými požadavky výrobce a trhu, pro který je vůz nasazen. Díky tomu existuje mnoho různých konstrukčních řešení závěsů a držáků specifických pro každou výfukovou soustavu a vůz.



Obr. 1.8: Závěs výfukové soustavy [1]

U většiny automobilů je výfuková soustava zavěšena ke karoserii po celé délce vozu. Jedná se o vozy s motorem vpředu a vyústěním výfukových plynů za auto, což je nejrozšířenější koncepce automobilů. Takto dlouhá výfuková soustava je vystavena rozmanitému namáhání. Jelikož tomuto namáhání musí být uzpůsobena také konstrukce, použitý materiál, umístění a počet závěsů a držáků výfukové soustavy, bude tato kapitola nejprve věnována definici namáhání, kterým jsou držáky a závěsy vystaveny. Na základě poznatků o namáhání bude následně popsána konstrukce závěsů a držáků výfukové soustavy.

1.2.1 Definice namáhání závěsů a držáků výfukové soustavy

Závěsy a držáky jsou kontaktem s výfukovou soustavou a umístěním v její těsné blízkosti vystaveny vysokým teplotám vyskytujícím se především v přední části výfuku. Teploty se vlivem změny režimu jízdy mohou výrazně měnit a kolísat. Na závěsy působí dynamické namáhání od výfukové soustavy při jízdě a na držáky vibrace přenášející se od pracujícího motoru. Závěsy podléhají mechanickému poškození od odletujících kamínků při jízdě. Závěsy a držáky musí odolávat působení povětrnostních vlivů a v zimním období také chemické degradaci působením posypových solí od vozovky. [4]

Všem těmto typům namáhání musí být uzpůsobena konstrukce a použité materiály zavěšení a připevnění výfukové soustavy. Jeho selhání znamená ztrátu funkčnosti výfukové soustavy a může mít dopad i na bezpečnost provozu celého vozu. Proto musí být závěsy vyrobeny

z pevného, teplotně a chemicky odolného materiálu. Jejich konstrukce dostatečně dimenzována na působící všech zatížení a jejich umístění vhodně určeno.

Statické zatížení

Statickým zatížením se rozumí napětí v závěsech od vlastní tíhy výfukové soustavy a rozdíly v napětí při studeném a teplém stavu výfukové soustavy způsobené její teplotní roztažností. Konstrukce závěsů umožňující teplotní roztažnost výfukové soustavy je základní předpoklad zajištění její správné funkce a maximální životnosti.

Parametrem souvisejícím se statickým namáháním je statická tuhost pružného členu závěsu. Jednotkou statické tuhosti je $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ a vyjadřuje poddajnost materiálu při změně statického zatížení. Statická tuhost je závislá na teplotě a se vzrůstající teplotou klesá. Díky znalosti statické tuhosti závěsu, teploty v požadovaném místě a materiálových charakteristik výfukové soustavy je možno výpočtem zjistit vektor síly působící v závěsech výfuku a také rozdíl velikosti a směru působení síly při studeném a prohřátém stavu. [9]

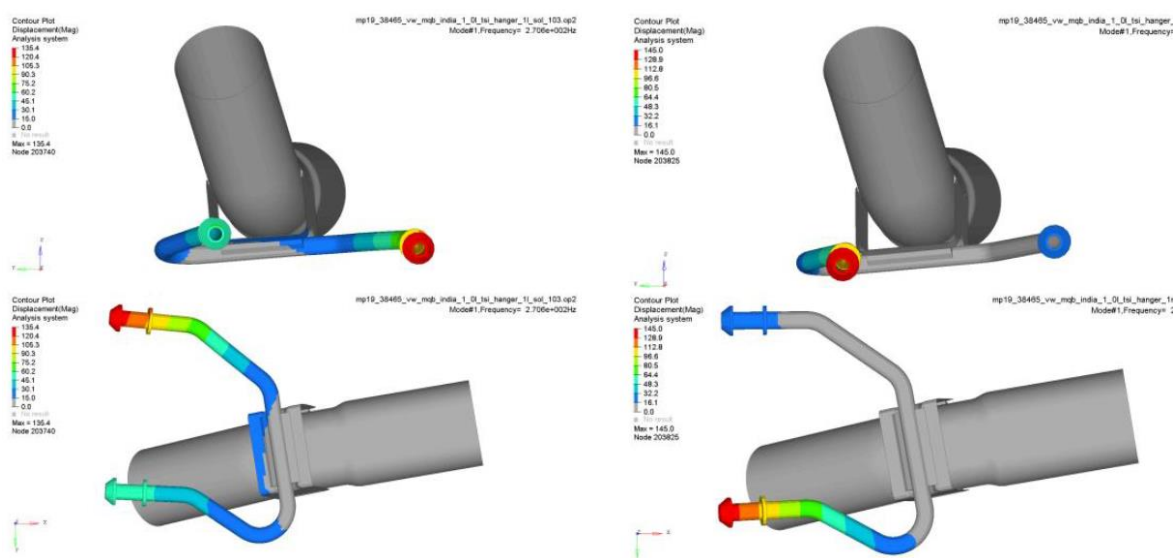
Dynamické zatížení

Dynamické zatížení je nejvýznamnějším mechanickým namáháním závěsů a držáků. Vzniká při jízdě automobilu po nerovnostech, při zatáčení, zrychlování a zpomalování, kdy je přes závěsy přenášeno z karoserie do výfukové soustavy, která svou reakcí působí zpět na závěsy silovým zatížením. Velikost sil v závěsech je odvislá od hmotnosti výfuku. Dynamické zatížení se projevuje pohyby výfukové soustavy, která dosahuje zrychlení až 10 g. Zdrojem dynamického zatížení je také pracující motor, od něhož se vibrace přenáší přes pevné závěsy do přední části výfuku.

Charakteristickým znakem sledovaným při dynamickém zatížení je maximální výkmit výfukové soustavy. Aby nedošlo k nárazu výfukové soustavy do okolních komponentů a jejich poškození, musí být maximální výkmit menší než stanovený odstup výfukové soustavy od okolní zástavby. Pomocí simulace je možno získat tzv. dynamickou obálku pohybů výfuku. Ta ukazuje hranice maximální výchylky výfukové soustavy při dynamickém namáhání v různých směrech. Vykreslením dynamické obálky pohybů výfuku je ověřen minimální odstup výfukové soustavy od okolních komponentů při reálné jízdě. [9]

Základní vlastností pružného členu závěsů z pohledu dynamického zatížení je dynamická tuhost [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$]. Dynamická tuhost je schopnost materiálu tlumit mechanické kmity. Dynamická tuhost je zjišťována experimentálně, kdy je zkušební vzorek upnut do měřicího mechanismu a postupně vystavován různým hodnotám předepnutí, teploty a frekvence vyvolávaných kmitů. Zjišťuje se závislost dynamické tuhosti na teplotě a frekvenci kmitů a výskyt vlastní frekvence závěsu. [9]

K důležitým metodám zjišťování odolnosti vůči dynamickému namáhání patří modální analýza (obr. 1.9). Jedná se o zjišťování odezvy objektu nebo soustavy na známé, přesně definované buzení, nejčastěji vibrací o různé frekvenci. Modální analýza se provádí výpočtem, např. pomocí metody konečných prvků nebo experimentálně. Výsledkem modální analýzy jsou vibrační módy představující samostatné a nezávislé pohyby, vizualizace ohybu a krutu objektu či sestavy. Každý mód popisuje vlastní frekvenci, tvar vlastního kmitu, tlumení daného módu a modální tuhost. Modální analýzou je ověřována vlastní frekvence závěsů a držáků výfukové soustavy. [10]

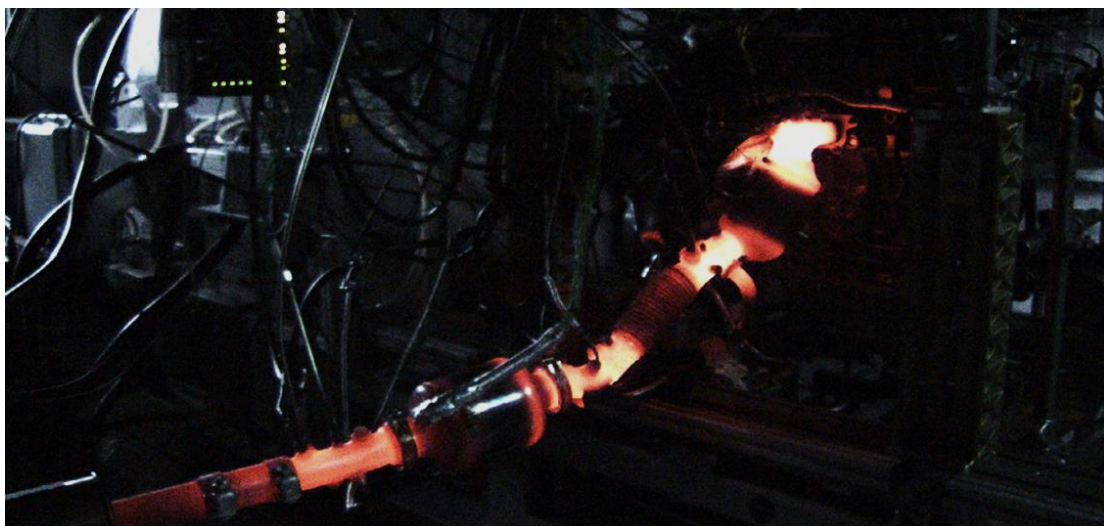


Obr. 1.9: Modální analýza držáku předního dílu výfuku [9]

Teplotní namáhání

Závěsy a držáky výfukové soustavy jsou vystaveny širokému teplotnímu rozpětí. Od teplot hluboko pod bodem mrazu v případě auta odstaveného v chladných klimatických podmínkách, až do teploty dosahující 1000 °C u držáků vystavených kontaktu s přední částí výfukové soustavy ohřáté od výfukových plynů (obr. 1.10) vystupujících z plně zatíženého zážehového

motoru. Teplota působící na závěsy a držáky se také často mění v závislosti na změnách jízdního režimu. Vnější vlivy mohou v závěsech způsobit rychlé změny teploty, tzv. teplotní šoky, které mohou poškodit především pevné spoje a svary závěsu. Příkladem takové situace je kontakt předního závěsu ohřátého od výfukového potrubí se studenou vodou. [4]



Obr. 1.10: Rozpálená výfuková soustava při testu na motorové brzdě [9]

Teplo se do závěsů šíří přenosem přes tepelně vodivé materiály nebo sáláním od výfukového potrubí. Kritickým místem s vysokou teplotou je motorový prostor kvůli členité konstrukci s nízkým prouděním vzduchu a přítomností komponentů ohřátých od výfukových plynů. Pevné držáky, které jsou v přímém kontaktu s přední částí výfuku a motorem, jsou proto konstruovány výhradně z oceli.

Pružné členy závěsů jsou vystaveny teplotnímu přenosu od háku, či držáku připevněného k výfukovému potrubí nebo působení tepla z okolí. Teplota přesahující maximální únosnou teplotu materiálu pružného členu způsobuje jeho degradaci a poškození. Mapování maximálních teplot v okolí výfukové soustavy je důležité zejména při výběru vhodného umístění pružných závěsů obsahujících pryžový nebo silikonový člen. Typická místa s výskytem vysokých teplot v okolí výfukové soustavy jsou ta s nízkým prouděním vzduchu, ve kterých se hromadí teplo sálající z výfukového potrubí. Kritickým jízdním režimem je potom pomalá jízda ve velkém zatížení, například jízda naloženého automobilu s vlekem do kopce. K lokálnímu zvyšování teploty a snížení intenzity proudění vzduchu v okolí výfukové soustavy napomáhají kryty podvozku používané pro dosažení lepší aerodynamiky vozu. [9]

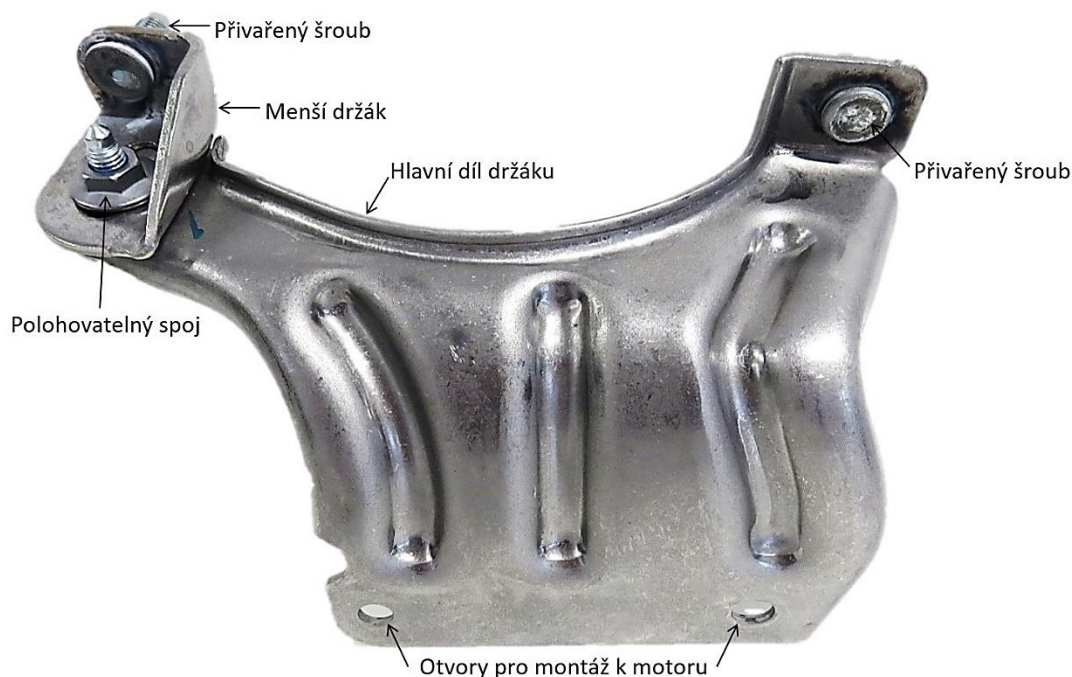
1.2.2 Pevné držáky a jejich konstrukce

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, přední část výfukové soustavy před vlnovcem je pevně uchycena k motoru. První pevné uchycení výfukové soustavy je pomocí příruby k hlavě motoru, sběrnému potrubí nebo turbodmychadlu. Jako spojovací prvek se používají tvarové spony u přírub s kruhovým tvarem nebo šrouby, popřípadě štefty a matice.

Pevné držáky jsou používány k uchycení motoru blízkého katalyzátoru k bloku či hlavě motoru. Mají podobu ohýbaných nebo lisovaných plechů, ke kterým jsou často přivařeny matky nebo šrouby používané k jejich uchycení. Držáky mohou být použity jako samostatné kusy nebo jako sestava. Počet, konstrukce a umístění pevných držáků vychází z tvaru a hmotnosti konkrétního katalyzátoru a možností upnutí k motoru. Držáky katalyzátoru nesou převážnou část hmotnosti přední části výfukové soustavy. Proto bývají pro zvýšení tuhosti vybaveny žebry a prolisy.

Kvůli přímému kontaktu s motorem a motoru blízkým katalyzátorem ohřátým na vysokou teplotu jsou držáky vyrobeny převážně z oceli, která těmto teplotám odolává. Konstrukce držáků musí být dostatečně pevná, aby nedošlo k jejich poškození vlivem působení vibrací motoru a tíhy katalyzátoru. Poškození držáků může vést ke ztrátě funkčnosti a bezpečnosti celé výfukové soustavy. Prevencí únavového poškození držáků vlivem vibrací motoru je naladění vlastní frekvence sestavy držáků s katalyzátorem mimo operační rozsah frekvencí vibrací motoru.

Příkladem sestavy pevného držáku je držák katalyzátoru na obr. 1.11. Tento držák je umístěn ve spodní části katalyzátoru a připevňuje jej k bloku motoru. Držák je vybaven přivařenými šrouby sloužícími k upevnění ke katalyzátoru a otvory pro šrouby k montáži k bloku motoru. Protože držák nese převážnou část tíhy katalyzátoru, následného výfukového potrubí a pružného členu, je robustní a tuhá konstrukce. Pro zvýšení tuhosti je tělo držáku vybaveno prolisy. K hlavnímu dílu držáku je šroubovým spojem připevněn menší držák. Díky drážce v menším držáku je vzájemná poloha obou kusů nastavitelná. Při montáži přední části výfukové soustavy k motoru je spoj mezi oběma díly držáku dotažen jako poslední. Dodržením tohoto postupu montáže dojde k samostatnému nastavení správné polohy obou dílů vymezující vliv tvarových nepřesností katalyzátoru. Předjde se tak vzniku předpětí v držáku nebo katalyzátoru při montáži.



Obr. 1.11: Pevný držák katalyzátoru [1]

1.2.3 Pružné závěsy a jejich konstrukce

Od vlnovce po koncovku je výfuková soustava zavěšena na pružných závěsech. Úkolem pružných závěsů je umožnit výfuku teplotní roztažnost a pohyby způsobené dynamickým namáháním a zároveň zabránit příliš velkému výkmitu a možnému nárazu do podlahy či okolních komponentů podvozku. Splněním těchto požadavků je dosaženo maximální životnosti výfukové soustavy a předejito poškození některého z komponentů. Pružné závěsy musí zabránit přenosu vibrací od výfuku do karoserie, což přispívá ke zvýšení komfortu posádky.

Pružné závěsy nabízí nepřehledné množství konstrukčních řešení odvislých od požadovaných vlastností, zástavbových možností umístění, způsobu uchycení, počtu větví a konstrukce výfukové soustavy a ceny závěsu. Pružné závěsy se zpravidla skládají ze tří základních částí: pevná část připevněná k výfukové soustavě, pružný člen a pevná část připevněná ke karoserii vozu nebo některému komponentu podvozku.

Pevná část na výfuku

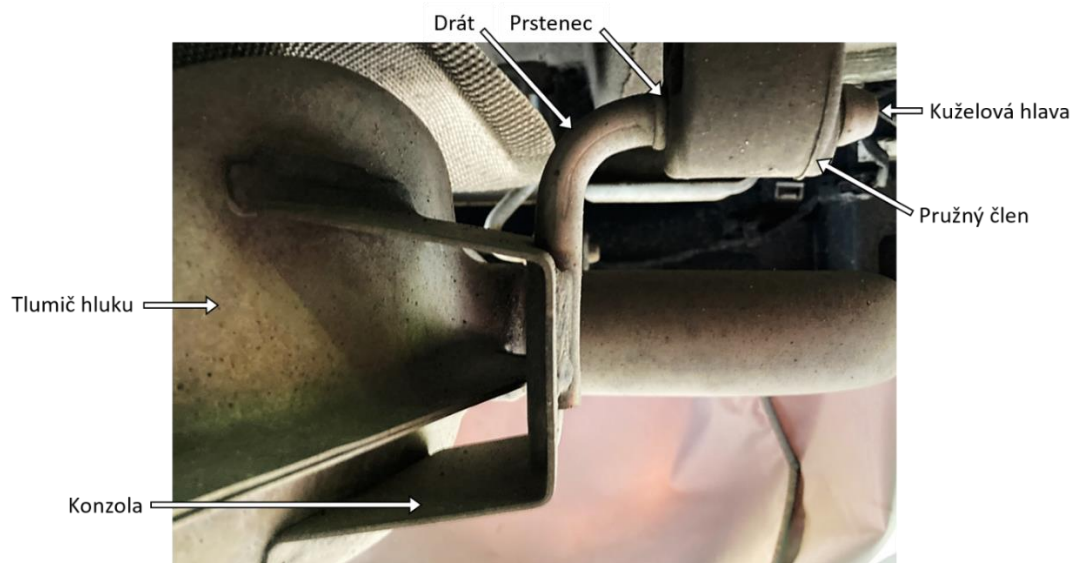
První částí pružného závěsu je pevná část připevněná k výfukovému potrubí nebo některému z komponentů výfukové soustavy, například k tlumiči hluku. Podle způsobu připojení k výfukové soustavě rozlišujeme dva typy části na výfuku: pevně připojená a

rozebíratelná. Pevně připojená část na výfuku je drát nebo trubka ve tvaru háku přivařená přímo k výfukové soustavě často doplněná o plechovou konzolu (obr. 1.13). Použití konzoly zvyšuje tuhost závěsu a umožňuje vytvoření kvalitnějšího svaru mezi závěsem a výfukovou soustavou. Druhým typem části na výfuku je rozebíratelná část ve formě objímky výfukového potrubí nebo jiného rozebíratelného spoje. Objímka na obrázku 1.12 je uložena v silikonových pouzdrech upevněných ke karoserii. Nasazení pevné nebo rozebíratelné části na výfuku závisí na způsobu demontáže výfukové soustavy z vozu.



Obr. 1.12: Závěs výfuku konstruovaný jako objímka potrubí [7]

Drát nebo trubka pružných závěsů je zakončen kuželovou hlavou a prstencem vyrobenými pěstováním (obr. 1.13), sloužícími jako zábrana proti vysunutí pružného členu, který je mezi ně nasazen. Použití trubky přináší výhodu v místech kontaktu s výfukovým potrubím o vysoké teplotě. Díky dutině je trubka v porovnání s drátem lépe ochlazována a snižuje teplotu povrchu na přijatelnou hodnotu pro nasazení pružného členu. Jelikož je část na výfuku v přímém kontaktu s horkým výfukovým potrubím, vyrábí se z oceli.



Obr. 1.13: Část na výfuku ve formě kombinace drátu a konzoly [7]

Pružný člen

Funkčním prvkem pružného závěsu je pružný člen. Je standartně vyráběn ze dvou materiálů, EPDM a silikonu. EPDM je pryž s teplotním rozsahem materiálové stálosti od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Silikon má rozsah materiálové stálosti od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cena silikonového pružného členu je vyšší, proto je přednostně nasazován na místa s výskytem příliš vysoké teploty pro nasazení pružného členu vyrobeného z EPDM pryže. Oba tyto materiály mají dobrou odolnost proti působení chemikálií, kyselin a povětrnostních vlivů, proto mají široké průmyslové využití a jsou vhodné k výrobě pružných členů závěsů výfuku.

Základní parametr sledovaný u pružných členů je jeho statická a dynamická tuhost v ose y a z^* . Tvar pružného členu udána jeho tuhost (obr. 1.14 a 1.15). Pružné členy jsou vybaveny oky, do kterých jsou nasunuty háky obou pevných částí: na výfuku a části na karoserii. Pružné členy jsou ve voze polohovány tak, že osy jejich ok jsou rovnoběžné s osou y . Pootočením pružného členu na háku je umožněna teplotní roztažnost výfukové soustavy. Pro zvýšení tuhosti závěsu se používá kombinace více pružných členů nebo těla části na karoserii poskytujícího pružnému členu oporu. Pohyby výfukové soustavy způsobují v pružných členech závěsů různorodá namáhání: tah, tlak, ohyb, krut i střih.



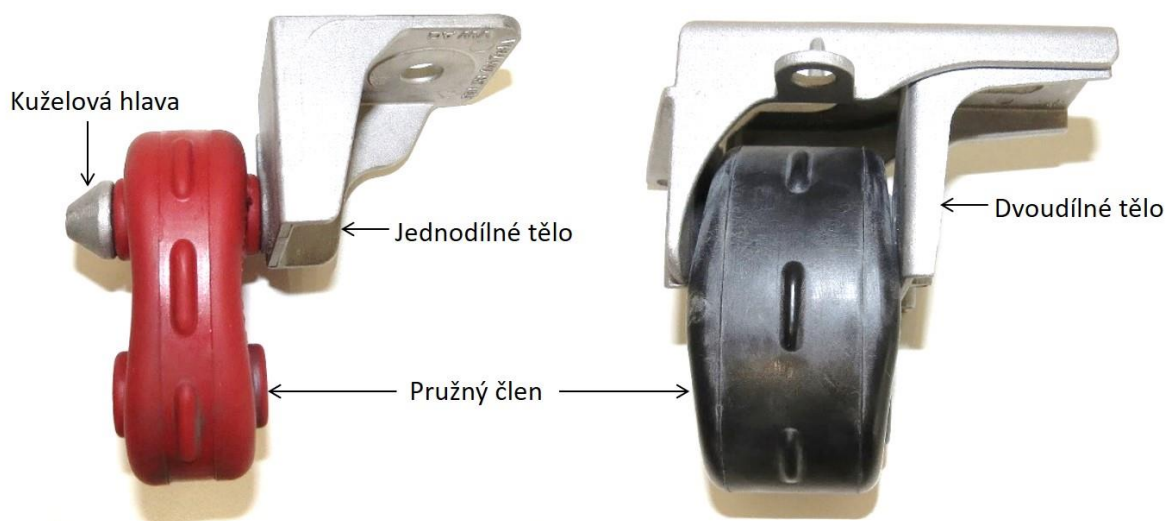
Obr. 1.14: Příklad různých tvarů pružného členu [1]

* Popisem os se rozumí souřadný systém automobilu. Platí také pro popis os dále v textu práce.

Pevná část na karoserii nebo komponentech

Poslední částí pružného závěsu je pevný článek spojující pružný člen s karoserií nebo některým z okolních komponentů, například nápravníci. Podobně jako část připevněná k výfuku i tato část je realizována jako pevná nebo rozebíratelná. Pevná konstrukce má podobu drátu nebo trubky ve tvaru háku pevně přichyceného ke karoserii nebo okolním komponentům pomocí svaru nebo nýtu s možností doplnění o plechovou konzolu. Drát či trubka je vybaven kuželovou hlavou a prstencem sloužícími jako doraz proti vysunutí pružného členu.

Rozebíratelná konstrukce využívá těla připevněného ke karoserii nebo okolnímu komponentu pomocí šroubu. Pro zabránění pootočení těla v případě povolení šroubového spoje je tělo vybaveno tvarovým prvkem zapadajícím do protikusu. Těla závěsů poskytují pružnému členu jednostrannou nebo oboustrannou oporu. Tělo je vyráběno ve formě jednoho kusu nebo vícedílné sestavy. Jednodílné tělo je vybaveno čepem zakončeným kuželovou hlavou pro nasunutí pružného členu. Vícedílné tělo svírá pružný člen nasazený na čepech obou částí. Porovnání různých konstrukcí těl části na karoserii je zobrazeno na obr. 1.15.



Obr. 1.15: Porovnání různých konstrukcí těl pružného závěsu [1]

Těla jsou vyrobena z oceli, odlita ze slitiny hliníku (obr. 1.15) nebo tepelně odolného plastu (obr. 1.16) v závislosti na maximální teplotě vyskytující se v místě jejich nasazení. Motivací pro použití těl z tepelně odolného plastu je jejich nižší cena v porovnání s kovovými díly, hmotnost a možnost vyrobít složité tvary díky výrobě vstřikováním. Tepelně odolné plasty zajišťují materiálovou stálost přibližně do teploty 175 °C.



Obr. 1.16: Závěs předního dílu výfuku vyrobený z tepelně odolného plastu [1]

1.2.4 Umístění závěsů

Počet a umístění závěsů závisí na konstrukci výfukové soustavy, hmotnosti, počtu větví a možností uchycení závěsu k okolní zástavbě. Závěsy výfukové soustavy musí být efektivně rozmístěny především z hlediska dynamického namáhání způsobujícího pohyby výfukové soustavy. Závěsy musí být umístěny v oblastech, kde se přirozeně vyskytují velké výkmity výfukové soustavy, kterým musí zabránit.

Při jízdě po nerovnostech může výfuková soustava působit zrychlením až 10 g. Závěsy musí být dimenzovány na působení sil vznikajících pohyby výfuku a připevněny na tuhém místě karoserie. Samotný spoj musí být dostatečně pevný, aby nedošlo k vytržení závěsu z karoserie. Tuhost místa připevnění závěsu je důležitá také pro zabránění přenosu vibrací od výfukové soustavy do karoserie a vzniku rezonancí při kmitání výfuku, které mají špatný vliv jak na životnost komponentů, tak na komfort posádky.

Umístění daného závěsu je také dáno lokální teplotou. Jedná se především o určení správného materiálu použitého na závěsu. Nižší teplota umožňuje používat těla závěsů z tepelně odolného plastu místo kovových a pružné členy z EPDM pryže místo silikonových. V obou případech je přínosem finanční úspora. Maximální teplota vyskytující se v místech jejich nasazení však nesmí přesáhnout únosnou teplotu materiálu.

2 Definice nároků na zavěšení výfukové soustavy

Na držáky a závěsy výfukové soustavy jsou kladeny vysoké nároky. Závěsy a držáky musí odolávat všem typům namáhání, které na ně působí. Jejich životnost nesmí být kratší než životnost výfukové soustavy, kterou svým působením nesmí negativně ovlivnit. Závěsy a držáky nesmí svým poškozením způsobit ztrátu funkčnosti výfukové soustavy. Pružné závěsy musí zabránit přenosu vibrací do karoserie vozidla, což pomáhá zvyšovat komfort posádky a zabránit nárazům výfuku do okolních komponentů. Dále musí být závěsy a držáky snadno montovatelné při sériové výrobě a snadno opravitelné. Při splnění zmíněných požadavků musí být cena závěsu co možná nejnižší.

2.1 Spolehlivost

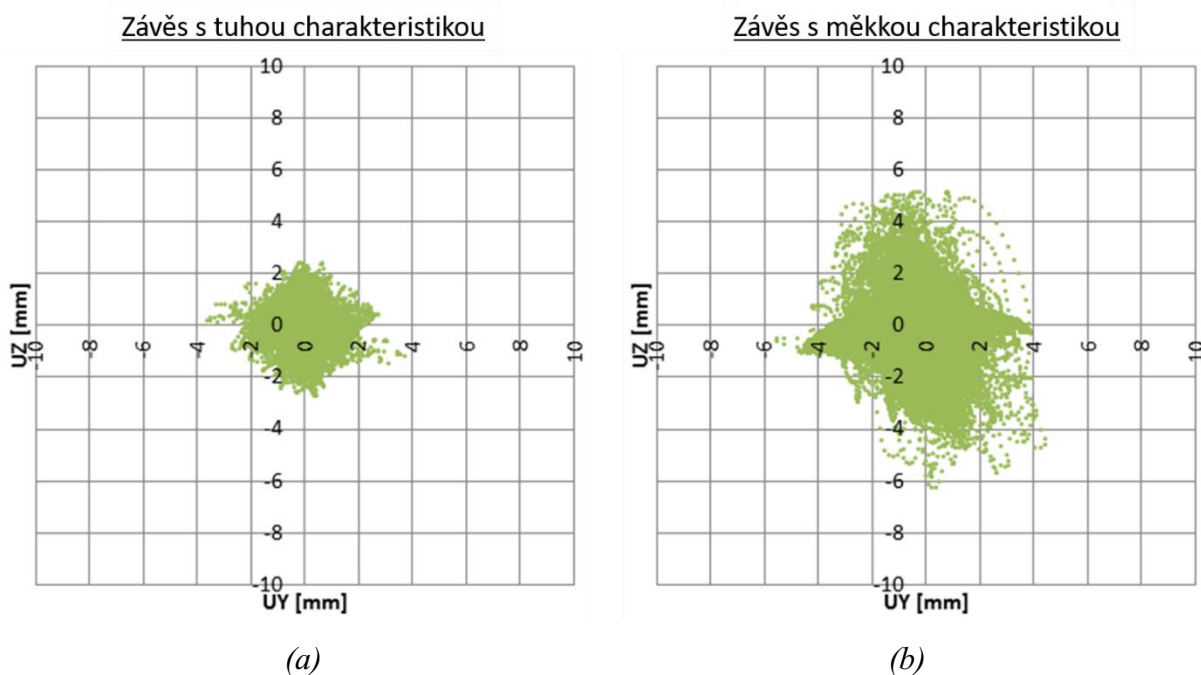
Spolehlivost dílu je souborem jeho bezporuchovosti (funkčnost dílu po stanovenou dobu), udržitelnosti (schopnost dílu setrvat ve stavu funkčnosti) a schopnosti zajistit údržbu dílu. Spolehlivost dílu je interpretací kvality dílu. Míra spolehlivosti je dána délkou intervalů mezi poruchami dílu. Spolehlivost automobilových dílů je sledována z důvodu zjištění jejich životnosti. Životnost je doba, po kterou je díl schopen plnit svoji funkci. Automobilové díly mají legislativou nebo výrobcem předepsanou životnost vztaženou k určené době nebo kilometrovému nájezdu vozu. [8]

Důsledkem poruchy závěsů a držáků výfukové soustavy může být nepřiměřené namáhání komponentů a spojů na výfukové soustavě, což zkracuje její životnost nebo způsobuje ztrátu plnění základních funkcí výfukové soustavy. Pokud by však došlo ke kontaktu horkého výfukového potrubí například s nádrží nebo k upadnutí výfukové soustavy, může taková porucha závěsů mít vliv na bezpečnost celého vozu či ostatních účastníků silničního provozu. Aby k těmto případům nedošlo, jsou závěsy a držáky podrobovány testování ověřující jejich spolehlivost.

Konstrukce závěsů výfukové soustavy musí být dostatečně dimenzována vzhledem k působení sil při dynamickém namáhání od výfukové soustavy po celou dobu její životnosti. V této souvislosti musí být závěsy také vhodně umístěny, viz kapitola 1.2.4. Životnost závěsů prodlužuje také odolnost materiálů proti působení povětrnostních vlivů a chemikálií a správný výběr materiálů z hlediska odolnosti vůči teplotám.

2.2 Tuhost pružných závěsů

Jelikož jsou pevné držáky považovány za tuhé, věnuje se tato kapitola pouze tuhosti pružných závěsů. Tuhost tělesa [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$] obecně vyjadřuje jeho deformaci při působení určité síly, respektivě o kolik mm se těleso zdeformuje při působení síly. Tuhost závěsů je sledována z důvodu tlumení pohybů výfukové soustavy při jízdě a zabránění příliš velkému výkmitu, aby nedošlo k nárazu výfukové soustavy do okolních komponentů. Tuhost závěsů musí být přímo úměrná hmotnosti výfukové soustavy a nepřímo úměrná odstavu výfukové soustavy od okolních dílů. Ze zástavbových důvodů je konstruktéry určen minimální odstup výfukové soustavy od ostatních komponentů, jako jsou stínící plechy tunelu karoserie, díly podvozku, nádrže atd. Porovnání pohybů a maximálních výkmitů stejné výfukové soustavy s použitím závěsů s rozdílnou charakteristikou tuhosti v oblasti prvního závěsu je na obrázku 2.1. Na obrázku jsou pomocí simulace do roviny yz vykresleny výchylky osy potrubí od středové polohy. Z obrázku 2.1 je zřejmé, že závěs s vysokou hodnotou tuhosti dovoluje výfukové soustavě nižší hodnoty výkmitu v porovnání se závěsem o nízké tuhosti. [9]



Obr. 2.1: Porovnání pohybů os potrubí výfukové soustavy při použití závěsu s tuhou (a) a měkkou (b) charakteristikou [9]

Výfuková soustava je zavěšena na několika pružných závěsech. První pružný závěs nasazený za vlnovcem je zpravidla ze všech pružných závěsů nejtužší a vykazuje malé hodnoty výkmitu výfukové soustavy. Tento závěs se považuje za bod, od kterého se projevuje teplotní roztažnost výfukového potrubí.

2.3 Náročnost montáže

Konstrukce závěsů výfuku musí umožnit snadnou a rychlou montáž. Náročnost montáže snižuje použití symetrických dílů, například pružných členů a dílů s jedinou správnou polohou. Například u závěsů připevněných ke karoserii pomocí šroubu snižuje náročnost montáže a zkracuje její čas použití tvarového prvku na závěsu, který pouze v jedné pozici zapadá do protikusu. Zjednodušení a zrychlení montáže najde uplatnění v sériové výrobě v podobě snížení možnosti špatné montáže dílů.

Montážně nejjednodušší typ závěsu je závěs složený z pružného členu a dvou háků. Montáž takového závěsu je provedena pouze nasunutím pružného členu na háky při potřebě minimálního času operátora výroby a bez nutnosti použití náradí. Háky však musí být ke karoserii a výfukové soustavě předem přivařeny. Přivaření háků je provedeno při svařování karoserie na automatické svařovací lince a při svařování výfukové soustavy, proto zde není uváděno. Pracnější typ z hlediska montáže, avšak stále bez nutnosti použití náradí, je závěs s jedním pružným členem nasazeným na třech hácích., popřípadě závěs s dvěma pružnými členy. U závěsů s tělem připevněným pomocí šroubu je zapotřebí použití utahovačky zajišťující správný utahovací moment šroubu předepsaný konstruktérem. Manipulace operátora s utahovačkou si žádá delší čas potřebný k provedení montáže. Pevné držáky jsou uchyceny pouze pomocí šroubového spoje. U přední části výfukové soustavy vybavené držákem motoru blízkého katalyzátoru s variabilní polohou dvou kusů je důležité při montáži dodržet správný postup utahování šroubů z důvodu prevence výskytu předpětí závěsu a katalyzátoru.

2.4 Udržovatelnost

Udržovatelnost je schopnost součásti setrvat ve stavu funkčnosti nebo obnovení jeho funkce po poruše. Skládá se z preventivní údržby, diagnostikovatelności poruchy a opravitelnosti. Preventivní údržba je prováděna za účelem snížení pravděpodobnosti poruchy součásti. Je prováděna na drahých a obtížně dostupných dílech a na dílech, jejichž porucha způsobí ztrátu provozuschopnosti vozu. Jelikož závěsy výfuku ani do jedné skupiny nespádají, preventivní údržba se u nich běžně neprovádí. Poruchy závěsů a držáků výfukové soustavy jsou zjišťovány především vizuální kontrolou. Oprava dílu je prováděna při zjištění poruchy, nejčastěji výměnou poškozeného dílu. [8]

V případě poruchy závěsu je výhodou jeho snadná opravitelnost, která je odvislá od konstrukčního řešení závěsu. Výměna pružného členu nasunutého na hácích je jednoduchá, sestávající z vysunutí háku přes kuželovou hlavu. Obtížnost případné výměny části pružného závěsu na výfuku nebo karoserii s rozebíratelným spojem závisí na stavu šroubového spoje. Výhodou je fakt, že většina rozebíratelných spojů pružných závěsů je snadno dostupná. Komplikovaná je opravitelnost pevných držáků přední části výfuku z důvodu špatné dosažitelnosti všech spojů kvůli členité zástavbě motorového prostoru. Nejkomplikovanější opravu způsobí pevně přivařené části pružných závěsů. V případě jejich poruchy je třeba odstranit zbytky dílu z poškozené oblasti a přivařit nový díl. Proto jsou pevně přivařené prvky dimenzovány s dostatečným součinitelem bezpečnosti, aby k jejich poruše nedocházelo.

2.5 Cena

Významným kritériem pozorně sledovaným v automobilovém průmyslu je cena jednotlivých dílů. Při velkosériové produkci přináší i minimální rozdíl jednotkové ceny dílu významné úspory nebo naopak zdražení celé produkce vozů, což přináší výrobci finanční úspory nebo ztráty. Cena dílů se promítá do celkové ceny vozu. Z toho důvodu jsou i závěsy a držáky výfukové soustavy vystaveny požadavku na dosažení nejnižší možné ceny. Vliv na cenu dílu má především počet vyrobených kusů, stav výrobních kapacit, požadavky na vlastnosti a kvalitu dílů, logistické potřeby a ekonomické podmínky v zemi výroby dílu.

U závěsů a držáků výfukové soustavy reflektuje cena konstrukční řešení a kvalitu použitých materiálů z pohledu pevnosti a teplotní odolnosti. Snahou je navrhnout co možná nejlevnější konstrukční řešení závěsů a držáků bez negativního dopadu na funkčnost, životnost a tuhost zavěšení. Z důvodu úspory nákladů jsou často existující konstrukční řešení závěsů zjednodušována. Místo odlévaných hliníkových těl jsou nasazovány ocelové háky a pokud to teplota dovoluje, jsou silikonové pružné členy nahrazovány pryžovými.

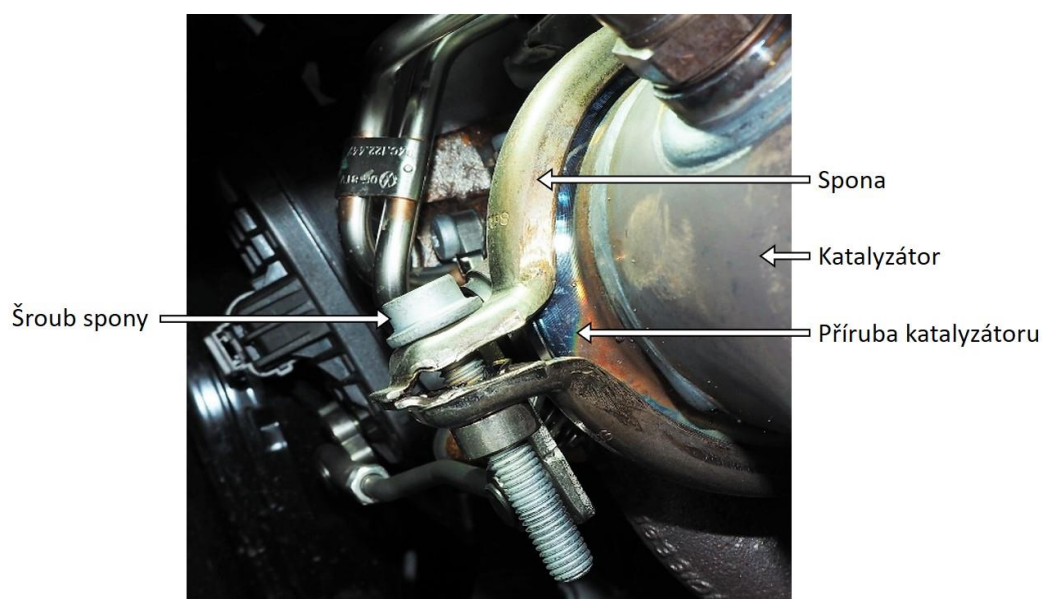
3 Analýza zavěšení výfukové soustavy u vybraného vozu

Jedním z cílů této diplomové práce je provést analýzu zavěšení výfukové soustavy u vybraného vozu. Analýza je provedena na základě poznatků o namáhání výfukové soustavy, konstrukce držáků a závěsu uvedených v kapitole 1.2 a nároků kladených na držáky a závěsy popsanych v kapitole 2.

Pro analýzu zavěšení byla vybrána výfuková soustava vozu Škoda Fabia třetí generace s motorem 1,0l TSI o výkonu 70 kW vyráběném od roku 2017 do současnosti. Jedná se o vůz s motorem umístěným vpředu a pohonem předních kol, což je nejrozšířenější koncepce automobilu. Výfuková soustava odvádí výfukové plyny za auto, a proto je zavěšena po celé délce vozu.

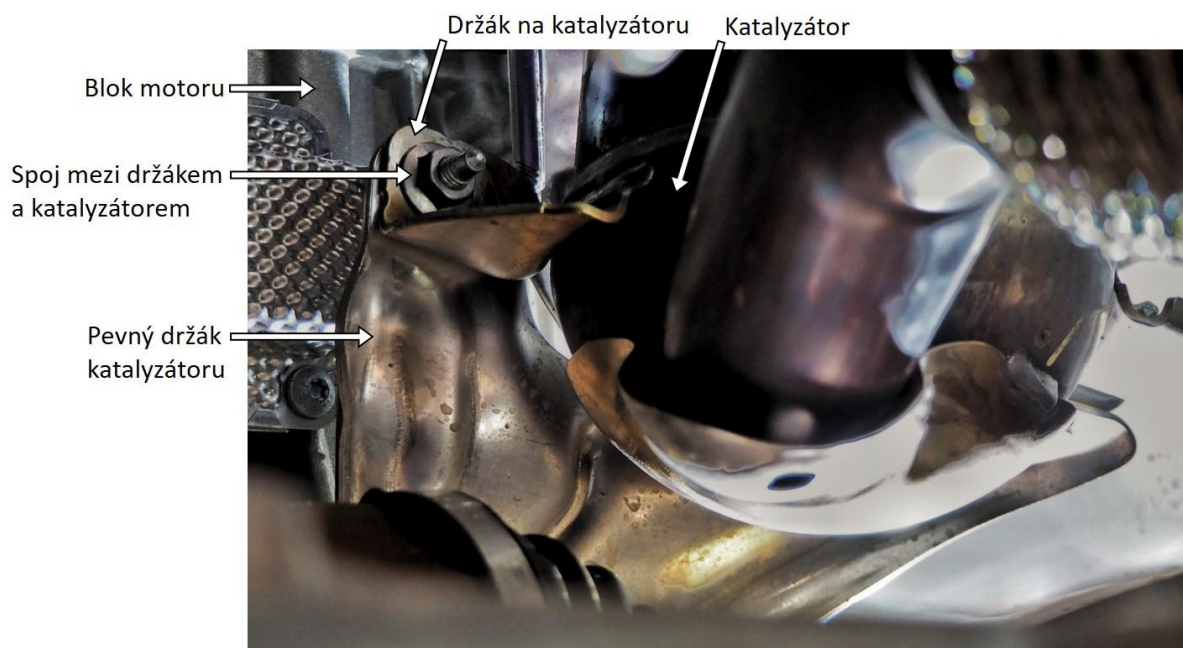
3.1 Pevné připojení přední části výfuku k motoru

Výfuková soustava je v přední části vybavena motorem blížkým katalyzátorem, který je pevně připojen k motoru. Příruba v horní části motoru blížkého katalyzátoru je připojena k přírubě turbodmychadla pomocí tvarové spony (obr. 3.1). Použití spony si žádá kruhový tvar obou přírub a sražené vnější stěny. Spona je přetažena přes obě příruby. Dotážením šroubu na sponě se zmenší její průměr a příruby jsou přes stěny spony ve tvaru písmene V přitlačeny k sobě. Těsnost spoje je zajištěna vložením těsnícího kroužku mezi příruby. Spona je vyrobena z oceli, aby odolala vysokým teplotám vyskytujících se za turbodmychadlem a na začátku výfukové soustavy. Alternativou ke spoji přírub pomocí spony je spoj pomocí šroubů.



Obr. 3.1: Spona mezi turbodmychadlem a motorem blížkým katalyzátorem [1]

Ve spodní části je katalyzátor uchycen k motoru pomocí pevného držáku (obr. 3.2). Ten je připevněn pomocí dvou šroubů k držákům po stranách katalyzátoru a dvou šroubů k bloku motoru. Robustní konstrukce držáku nese převážnou část hmotnosti přední části výfuku od katalyzátoru po vlnovec a odolává vibracím přenášejícím se od pracujícího motoru. Přesný tvar držáku je dán rozmístěním přípojovacích bodů na motoru i katalyzátoru, hmotností a rozměry katalyzátoru, požadovanou tuhostí a optimalizací jeho vlastní frekvence. Pro zvýšení tuhosti je tělo držáku vybaveno prolisy.



Obr. 3.2: Držák mezi motorem a motoru blízkým katalyzátorem [1]

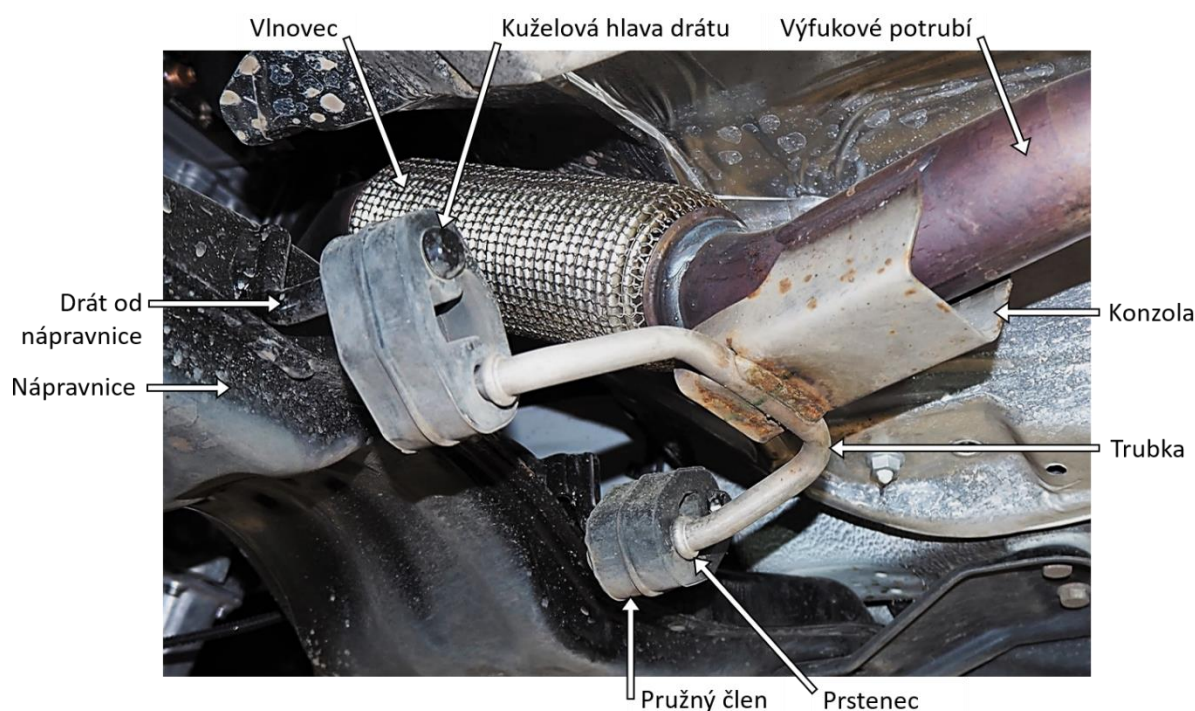
Dvoudílná konstrukce držáku a dodržení správného postupu montáže výfuku k motoru (viz kap. 1.2.2) zabráňuje výskytu předpětí v držáku a katalyzátoru a předchází nadměrnému namáhání obou dílů. Z důvodu vystavení vysokým teplotám kontaktem s katalyzátorem i motorem je držák vyroben z oceli. Podobná koncepce držáku je běžně používána u všech výfukových soustavách vybavených motoru blízkým katalyzátorem uchyceným k motoru. Alternativou může být náhrada tohoto držáku dvěma samostatnými držáky, popřípadě doplněním dalším držákem, například v horní části katalyzátoru.

3.2 První pružný závěs

Za vlnovcem tvořícím hranici mezi pevným a pružným uložením je výfuková soustava dále zavěšena na pružných závěsech. Prvním ze tří pružných závěsů je držák předního dílu výfuku umístěný nedaleko za vlnovcem. Na výfukovém potrubí je přivařena plechová konzola

vybavená prolisem, v němž je uložena trubka o průměru 12 mm s tloušťkou stěny 1,5 mm, jejíž oba konce směřují dopředu (obr. 3.3). Použitím konzoly je díky zkrácení trubky dosaženo vyšší tuhosti držáku a lepší kvality svarů držáku oproti variantě s dlouhým drátem přivařeným přímo k výfukovému potrubí. Díky dutině v trubce je teplota na koncích trubky dostatečně nízká pro nasazení pružných členů z EPDM pryže. Trubka je na obou koncích opatřena typickou kuželovou hlavou a prstencem vyrobenými pěchováním a sloužícími jako doraz pro pružné členy. Trubka i konzola jsou vyrobeny z oceli.

Na koncích trubky jsou nasazeny dva pružné členy vyrobené z EPDM pryže. Druhým okem jsou pružné členy nasazeny na dráty ve tvaru háku přivařené k přední nápravnici. Háky od nápravnice jsou také vybaveny kuželovou hlavou zabráňující vysunutí pružného členu z háku. Osy ok pružných členů jsou polohovány ve směru osy x. Horní oka jsou v porovnání se spodními vychýlena do stran. Toto řešení zvyšuje tuhost závěsu v ose y.



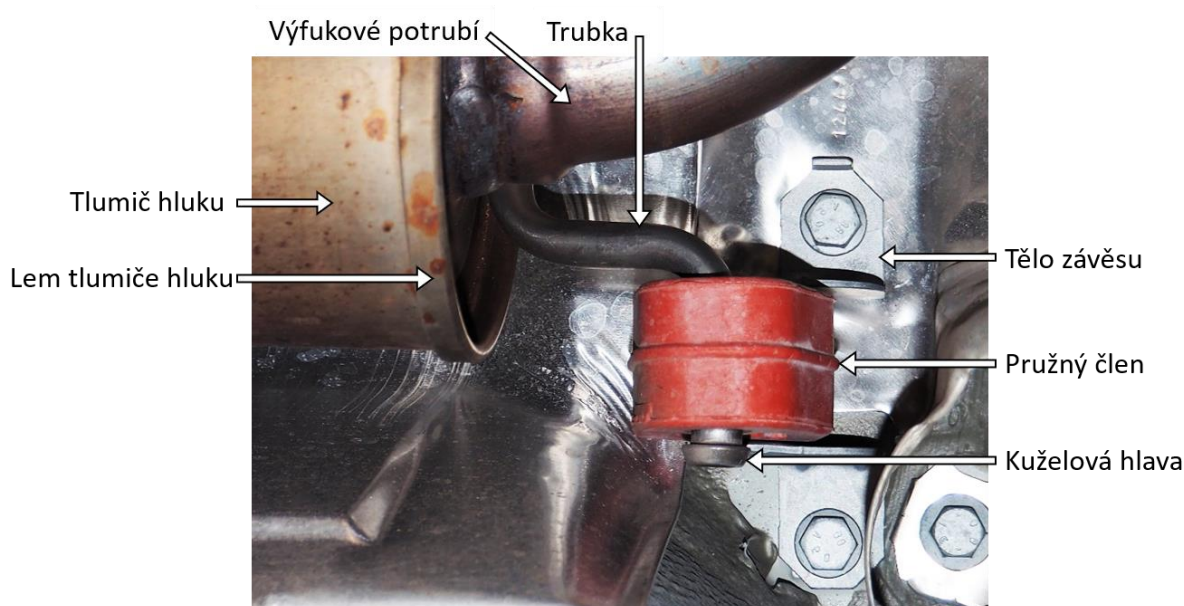
Obr. 3.3: První pružný závěs [1]

Alternativou k tomuto typu závěsu je závěs na obr. 1.16, který se používá u jiných modelů vozů značky Škoda. Závěs na obrázku 3.3 nabízí v porovnání s alternativním závěsem nižší tuhost, která je však dostatečná z hlediska hmotnosti výfukové soustavy a odstupů výfukové soustavy od okolních komponentů modelu Fabia. Výhodou závěsu na obr. 3.3 je fakt, že pro montáž není potřeba náradí. Montážním krokem tohoto závěsu je nasunutí pružných členů na dráty od nápravnice. Alternativní závěs je připevněn k nápravnici pomocí dvou šroubů.

3.3 Druhý pružný závěs

Druhý pružný závěs (obr. 3.4) je umístěn ve střední části výfukové soustavy. Výhoda umístění závěsu do tohoto místa je zabránění velkým výchylkám kmitů výfukové soustavy, které se v tomto místě přirozeně vyskytují kvůli následnému trasování výfukového potrubí podél palivové nádrže. Na koncovém štítu prvního tlumiče je přivařena ocelová trubka o průměru 12 mm s tloušťkou stěny 1,5 mm, která svým tvarem kopíruje lem štítu tlumiče. Konec trubky je vybaven klasickou kuželovou hlavou, prstenec v tomto případě chybí. Na konci trubky je nasazen pružný člen ze silikonu. Pružný člen je polohován tak, že osy jeho ok jsou rovnoběžné s osou y. Tepelná roztažnost výfuku je umožněna pootočením pružného členu na drátu. Horním okem pružného členu je protažen čep pevně uložený v těle závěsu vyrobeném ze dvou ohnutých ocelových plechů. Tělo je pomocí dvou šroubů připevněno ke karoserii vozu, jeho montáž si proto žádá použití utahovačky.

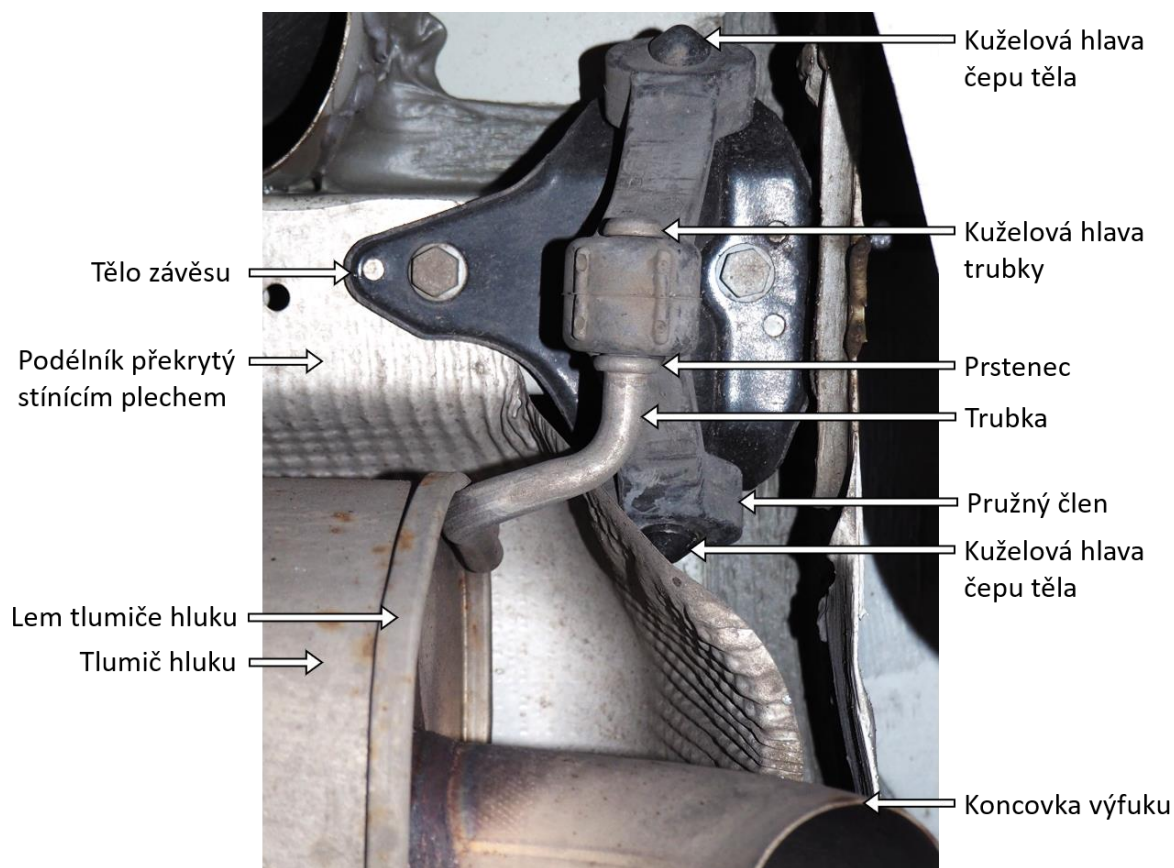
Konstrukce alternativních závěsů je vždy přizpůsobena konkrétním požadavkům na upevnění k vozu a výfukové soustavě. Možností je použití rozebíratelného spoje na výfuku, pevného spoje na karoserii, jiné konstrukce těla anebo pružného členu z materiálu EPDM s rozdílným tvarem.



Obr. 3.4: Druhý pružný závěs [1]

3.4 Třetí pružný závěs

Třetí pružný závěs (obr. 3.5) je umístěn v koncové části výfukové soustavy. Na koncovém štítu druhého tlumiče je přivařena trubka o průměru 12 mm s tloušťkou stěny 1,5 mm kopírující zahnutí lemu tlumiče. Trubka je na konci vybavena kuželovou hlavou a prstencem. Pružný člen vyrobený z EPDM elastomeru má tvar písmene V a je vybaven třemi oky. Prostředním okem je pružný člen nasazen na trubce od tlumiče. Krajní oka jsou nasazena na čepech těla závěsu zakončených kuželovými dorazy. Tělo je odlito z hliníku a tvarováno tak, aby kopírovalo tvar zadního podélníku, na který je pomocí dvou šroubů připevněno. Závěs je připevněn pomocí dvou šroubů k podélníku.



Obr. 3.5: Třetí pružný závěs [1]

Alternativou tohoto závěsu jsou například všechny závěsy uvedené v kapitole 4 této práce. Různá konstrukční řešení vycházejí z požadované ceny závěsu, tuhosti a typu uchycení k výfukové soustavě nebo karoserii. Použití těla poskytujícího oporu gumového členu je nasazeno v případě malých odstupů výfukové soustavy od okolních komponentů, popřípadě výfukové soustavy o vyšší hmotnosti. Alternativou je také použití závěsu s kombinací více pružných členů nebo použití většího počtu závěsů nesoucích váhu tlumiče hluku.

4 Návrh vlastního konstrukčního řešení

Cílem této diplomové práce je navrhnout konstrukční řešení a ověřit pevnost jednoho uzlu závěsu pro konkrétní vůz a konkrétní výfukovou soustavu. Úkolem je navrhnout poslední pružný závěs výfukové soustavy v oblasti zadního tlumiče a koncovky výfuku. Výfuková soustava je jednovětвовá, s ústím koncovky za zadní nárazník. Závěs musí plnit všechny technické, montážní a ekonomické okrajové podmínky a nároky, které jsou na něj kladeny.

Hlavním cílem je navrhnout řešení optimalizující cenové náklady referenčního závěsu jednodušší konstrukcí. S přihlédnutím na okrajové podmínky trhu plánovaného nasazení tohoto závěsu musí být zaručena jeho vysoká spolehlivost z důvodu špatné kvality a nízké hustoty servisů v zemi plánovaného nasazení. Tuhost závěsu musí být dostatečná, aby maximální výkmit výfukové soustavy při jízdě nebyl větší než minimální stanovený odstup 20 mm výfukové soustavy od okolních komponentů. Je tak zabráněno nárazům výfukové soustavy do okolních komponentů a jejich možnému poškození. Závěs musí umožnit pohyby výfukové soustavy způsobené změnou její délky při teplotní roztažnosti. Délkové rozdíly mezi studeným a teplým stavem výfukové soustavy se nejvíce projevují právě v oblasti koncovky výfuku a činí až 15 mm.

4.1 Posuzované parametry závěsu a definice jejich hodnocení

Výběr konkrétního konstrukčního řešení probíhal posouzením jednotlivých parametrů navržených konceptů závěsu. Hodnocenými parametry byly tuhost závěsu, náročnost jeho montáže při sériové výrobě, opravitelnost a cena. Parametrům byla následně přiřazena váha (koeficient významnosti) s ohledem na všechny okrajové podmínky a byl určen nejvýznamnější parametr. Určení důležitosti parametrů pomohlo při výběru konkrétního konstrukčního řešení závěsu. U všech parametrů byl vytvořen způsob bodového hodnocení, na základě kterého byly jednotlivé koncepty ohodnoceny.

4.1.1 Tuhost závěsu

Tuhost závěsu [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$] vyjadřuje jeho deformaci při působení určité síly a určuje, jak velkého výkmitu výfuková soustava při dynamické jízdě po nerovnostech dosáhne. Maximální výkmit výfukové soustavy nesmí být větší než její stanovený odstup 20 mm od okolních komponentů. Největší vliv na tuhost závěsu má tvar pružného členu. Přítomnost těla závěsu poskytující jednostrannou nebo oboustrannou oporu zvyšuje celkovou tuhost závěsu.

Zpravidla se udává tuhost samotného pružného členu bez zohlednění vlivu těla závěsu. Vliv přítomnosti těla bude zhodnocen v případě, že se prokáže nedostatečná tuhost vybraného konstrukčního řešení závěsu. Tuhosti pružných členů uvedené v tabulce 4.1 byly zjištěny z jejich technických výkresů, neboť všechna navržená konstrukční řešení závěsů jsou vybavena již existujícím a používaným pružným členem. V přehledové tabulce 4.1 jsou uvedeny tuhosti pružných členů ve směru osy y a z při teplotě 20 °C a buzení kmitů o frekvenci 20 Hz. Na základě součtu hodnot tuhostí v obou směrech bylo pružným členům přiřazeno bodové ohodnocení, které bylo následně použito při výběru konstrukčního řešení. Nejtužší pružný člen byl ohodnocen známkou 10 bodů a ostatní závěsy získaly bodové hodnocení odpovídající poměru jejich tuhosti vůči tuhosti nejtužšího pružného členu.

Tab. 4.1: Přehled tuhostí pružných členů a jejich bodového ohodnocení [1],[9]

	Tuhost ve směru osy y [N·mm ⁻¹]	Tuhost ve směru osy z [N·mm ⁻¹]	Bodové ohodnocení tuhosti pružného členu
Pružný člen varianty 1 a 2	36	63	10
Pružný člen varianty 3	16	30	5
Pružný člen varianty 4	10	49	6

4.1.2 Náročnost montáže

Rozsahem montáže uvedeném v této kapitole se rozumí upevnění šroubovaného závěsu ke karoserii a upevnění výfukové soustavy k závěsu v sériové výrobě. Náročnost montáže je odvislá od počtu kroků montážní operace a nutnosti manipulace s nářadím. Tyto skutečnosti mají vliv na celkovou dobu potřebnou pro montáž. Montážní náročnost je proto v této práci vyjádřena v čase [s] potřebném k montáži. Čas montáže prodlužuje požadavek na preciznost provedení v případě, kdy je například potřeba nějaký prvek přesně ustavit (tělo závěsu k podélníku kvůli drážkování).

Náročnost montáže se z hlediska času operátora považuje za jeden z nákladů při montáži, proto obecně platí, že čím kratší dobu montáž závěsu trvá, tím lépe. Ačkoliv je v sériové výrobě nářadí umísťováno v těsné blízkosti operátora a zásobní boxy pružných členů a závěsů jsou v blízkosti montážní linky, je třeba uvažovat časovou přírážku při práci operátora nezbytnou k podání nářadí, pružného členu nebo závěsu. Tyto prodlevy jsou v časech jednotlivých úkonů

montáže navržených konstrukcí závěsů v tabulce 4.2 započítány. Časy v tabulce 4.2 přehledu trvání úkonů jsou stanoveny autorem na základě poznatků získaných při návštěvě sériové výroby. U závěsů skládajících se z háků přivařených k podélníku není tento krok do času montáže zahrnut, protože přivaření háků probíhá během svařování karoserie. Není zde také zahrnut čas přivaření držáku k tlumiči, neboť je tento krok proveden při svařování výfukové soustavy.

Tab. 4.2: Přehled úkonů a potřebného času k jejich provedení při montáži závěsů [1]

Úkon	Čas potřebný k provedení úkonu [s]
Ustavení těla závěsu k podélníku	10
Podání utahovačky	7
Utažení jednoho šroubu	5
Odložení utahovačky	6
Nasunutí pružného členu na hák od karoserie	10
Nasazení držáku výfukové soustavy do oka pružného členu	9

Podle celkového času potřebného k montáži bylo dle tabulky 4.3 přiřazeno jednotlivým variantám bodové ohodnocení následně použité při výběru konstrukčního řešení.

Tab. 4.3: Bodové hodnocení času montáže závěsu [1]

Čas montáže závěsu [s]	1–10	11–20	21–30	31–40	41–50
Bodové ohodnocení času montáže	10	8	6	4	2

4.1.3 Opravitelnost

Parametr spadající do udržitelnosti hodnocený u konceptů závěsu je opravitelnost. Zváženy jsou možné poruchy jednotlivých komponentů a složitost jejich následné opravy. Jak již bylo popsáno v kapitole 2.4, porucha některého z komponentů závěsu výfukové soustavy se řeší jeho výměnou. Hodnocena je náročnost výměny komponentu s přihlédnutím na možná rizika a komplikace při opravě.

Opravitelnost byla hodnocena přiřazením bodové známky závěsům s následujícím významem:

- **10 bodů** – jednoduchá oprava
 - Možnost výměny některého z poškozených dílů bez nutnosti demontáže, či výměny celého závěsu.
- **5 bodů** – středně složitá oprava
 - Nutná výměna celého závěsu, možnost komplikace při demontáži rozebíratelného spoje.
- **1 bod** – komplikovaná oprava
 - Porucha závěsu si žádá zásah do karoserie ve formě odstranění zbytků starého dílu a přivaření nového dílu.

4.1.4 Cena

Ceny jednotlivých konceptů konstrukčních řešení závěsu jsou stanoveny po konzultaci s odborným útvarem společnosti ŠKODA AUTO a.s. Cílem této práce je optimalizovat cenu nejdražšího konstrukčního řešení závěsu, kterým je referenční závěs (varianta 1). Ceně referenčního závěsu byla v této práci přiřazena hodnota 1 a ceny ostatních závěsů jsou vyjádřeny poměrem vůči ceně referenčního závěsu. Ceny ostatních konceptů závěsu jsou proto vyjádřeny číslem menším než 1. Cena sestavy závěsu se skládá ze sumy cen jednotlivých dílů, z kterých je závěs sestaven a nákladů na kompletaci sestavy závěsu. V ceně sestavy nejsou zahrnuty montážní náklady pro připevnění pevných částí závěsu ke karoserii, protože je toto provedeno při svařování karoserie. Ceně závěsů byla přiřazena bodová známka (tab. 4.4).

Tab. 4.4: Bodové hodnocení ceny závěsu [1]

Cena závěsu [-]	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Bodové hodnocení	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Přehled cen konceptů závěsů včetně jejich bodového ohodnocení je uveden v tabulce 4.5. Referenční závěs jakožto předmět cenové optimalizace v této práci byl ohodnocen známkou 0 bodů.

Tab. 4.5: Přehled cen konceptů závěsů a jejich bodového ohodnocení [1]

Závěs	Cena závěsu [-]	Bodové ohodnocení
Varianta 1	1	0
Varianta 2	0,6	4
Varianta 3	0,4	6
Varianta 4	0,3	7

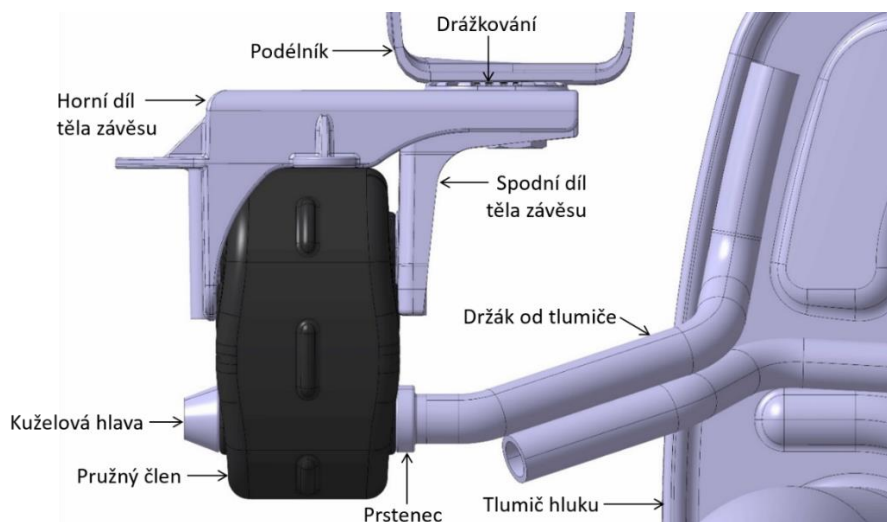
4.2 Návrh konceptů závěsu

Celkem byly navrženy tři konstrukční řešení zadního závěsu výfukové soustavy. Do výběru bylo také zařazeno existující referenční řešení zadního závěsu používané pro podobnou výfukovou soustavu. Výběr proto probíhal ze čtyř konstrukčních řešení. Rozdíly mezi závěsy jsou v konstrukci části připevněné k vozu, ve způsobu uchycení k vozu a v použitém pružném členu. Orientace gumových členů všech závěsů je taková, že umožňuje teplotní roztažnost výfukové soustavy pootočením na čepu háku či těla závěsu.

Všechny závěsy jsou uchyceny k levému zadnímu podélníku karoserie. Ten je jako upevňující díl z okolních dílů nejvhodnější, neboť jako nosný prvek karoserie nabízí velkou tuhost, čímž zabraňuje přenosu vibrací do karoserie a zaručuje vysokou pevnost spoje. Pravděpodobnost, že dojde k vytržení závěsu z podélníku je proto minimální v porovnání s ostatními díly (například výlisku pro rezervu), ke kterým je možno závěs upevnit.

4.2.1 Varianta 1

První variantou je převzetí již existujícího závěsu používaného pro jinou výfukovou soustavu (obr. 4.1). Tento závěs je použit jako referenční závěs a předmět optimalizace. Tělo tohoto závěsu je sestaveno ze dvou dílů odlitých z hliníku, vzájemně spojených nýtem. Tělo je k podélníku vybaveném z vnitřní strany přivařenou matkou přichyceno šroubem se závitem M8. Dosedací plocha těla i podélníku je opatřena drážkami. Ty do sebe zapadají a zabraňují pootočení těla. Oba díly těla jsou na vnitřní části vybaveny čepem. Na čepch je nasazen pružný člen uzavřený mezi oba díly těla. Pružný člen je vyroben z EPDM pryže. Na koncovém štítu zadního tlumiče je přivařen dvoudílný držák z ocelové trubky o průměru 10 mm zakončené kuželovou hlavou a prstencem, mezi které je nasazen pružný článek závěsu.



Obr. 4.1: Návrh konstrukce zadního závěsu – varianta 1 [1]

Tuhost závěsu

Výhodou této konstrukce je vysoká tuhost ve směru os y a z daná robustním a tuhým pružným členem. Tuhost v ose y je ještě zvýšena přítomností těla sloužícího jako oboustranná opora pružnému členu. Tuhost závěsu varianta 1 je dle tabulky 4.1 ohodnocena bodovou známkou 10.

Náročnost montáže

Montáž tohoto závěsu je poměrně časově náročná z důvodu manipulace s utahovačkou a nutné preciznosti při usazování závěsu k podélníku a utahování šroubu, kdy nesmí dojít k poškození závitu. Čas potřebný k montáži závěsu varianta 1 byl stanoven na 37 s (tab. 4.6) a dle tabulky 4.3 byla doba montáže této varianty ohodnocena bodovou známkou 4.

Tab. 4.6: Přehled úkonů a potřebného času k montáži závěsu varianta 1 [1]

Úkon	Čas potřebný k provedení úkonu [s]
Ustavení těla závěsu k podélníku	10
Podání utahovačky	7
Utažení jednoho šroubu	5
Odložení utahovačky	6
Nasazení držáku výfukové soustavy do oka pružného členu	9
Celkový čas	37

Opravitelnost

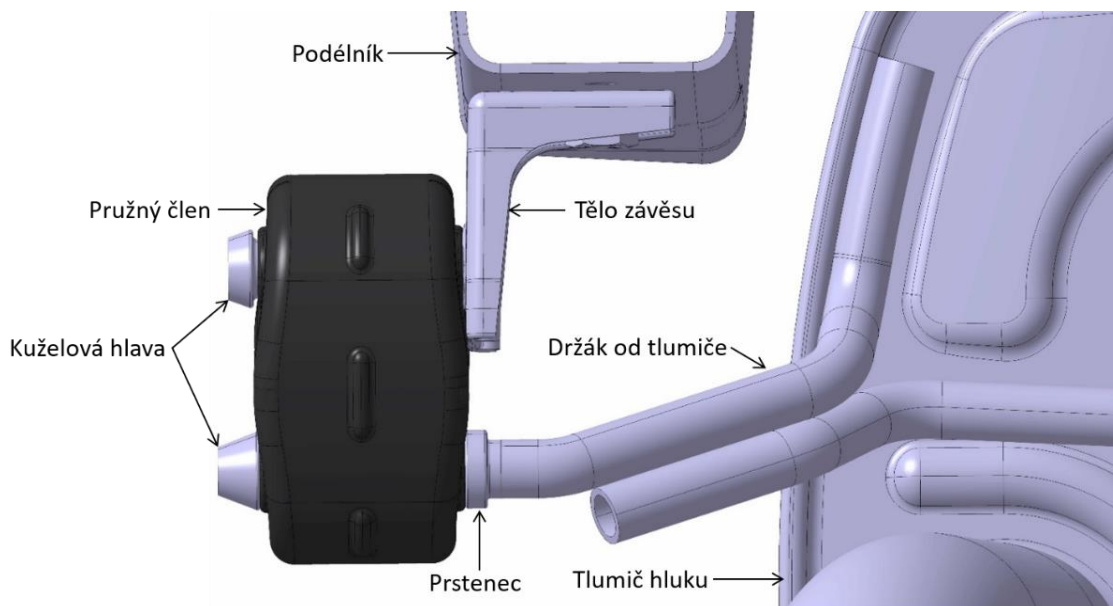
V případě poruchy nebo prasknutí jednoho z dílů těla závěsu nebo pružného členu je nutnost výměny celé sestavy závěsu. Výhodou je rozebíratelný spoj pevné části na karoserii. Jedinou komplikací je možná koroze na šroubovém spoji. Kvůli nutné demontáži celého závěsu je opravitelnost této konstrukce závěsu dle kapitoly 4.1.3 ohodnocena bodovou známkou 5.

Cena

Vysoká cena závěsu je způsobena nákladným výrobním procesem při odlévání obou kusů těla a vytvoření sestavy pomocí nýtového spoje. Cena samotného pružného členu je ze všech pružných členů použitých v konceptech závěsů nejvyšší. Jedná se o nejdražší závěs ze všech hodnocených konceptů, který je předmětem cenové optimalizace, a jehož hodnota je vyjádřena známkou 1 a bodové ohodnocení podle tabulky 4.5 známkou 0.

4.2.2 Varianta 2

Konstrukční řešení druhého konceptu závěsu (obr. 4.2) vychází z předchozí varianty. Horní díl těla závěsu byl odpadnut. Čep pro nasazení pružného členu na vnitřním díle, který je odlit z hliníku, byl prodloužen a zakončen kuželovou hlavou. Na tělo je přidáno drážkování pro ustavení k podélníku. Zachováno bylo připevnění pomocí šroubu se závitem M8 k podélníku vozu. Pružný člen i držák na tlumiči jsou převzaty z předchozí varianty.



Obr. 4.2: Návrh konstrukce zadního závěsu – varianta 2 [1]

Tuhost závěsu

I přes odpadnutí jednoho z dílů těla závěsu poskytujícího oporu gumovému členu, byla tuhost díky zachování robustního pružného členu a jednostranné opory pružného členu ve srovnání s variantou 1 ovlivněna pouze minimálně. Tuhost závěsu varianta 2 je dle tabulky 4.1 ohodnocena bodovou známkou 10.

Náročnost montáže

Zjednodušení těla závěsu montážní proces nezměnilo v porovnání s montáží varianty 1. Stále platí nutné použití utahovačky, nutná preciznost při usazování závěsu k podélníku a utahování šroubu. Čas potřebný k montáži závěsu je proto zachován 37 s. Postup montáže a bodové ohodnocení zůstává identické jako u varianty 1, tedy 4 body.

Opravitelnost

Opravitelnost tohoto typu závěsu byla v porovnání s variantou 1 zjednodušena. Při poruše pružného členu nebo těla není nutná výměna celého závěsu a je vyměněn pouze poškozený díl.

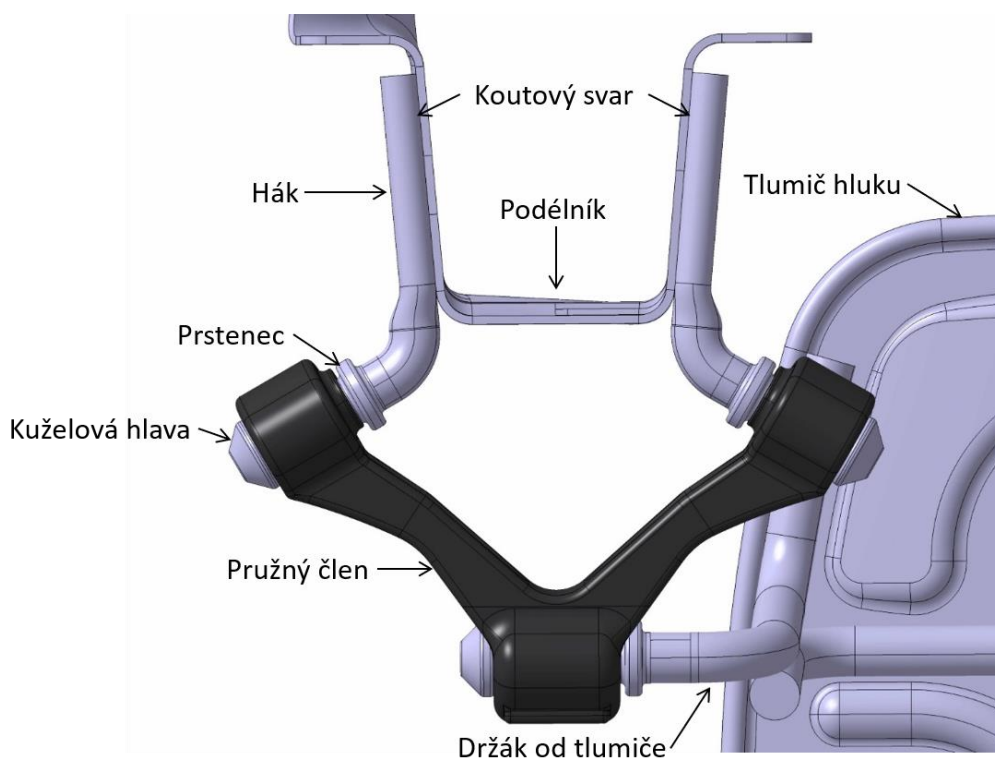
V případě poruchy pružného členu není potřeba demontáže těla. Pružný člen je z těla závěsu snadno demontovatelný vysunutím, stejně jako tělo od podélníku odšroubováním. Jedinou komplikací je možná koroze na šroubovém spoji. Opravitelnost je proto podle kapitoly 4.1.3 ohodnocena bodovou známkou 10.

Cena

Odpadnutím vnějšího dílu těla závěsu došlo také k redukci ceny. Oproti variantě 1 je ušetřena nejenom cena odlévaného dílu, levnější je také kompletace závěsu, kdy není třeba vytvářet nýtový spoj. Cena tohoto závěsu je dle tabulky 4.5 ohodnocena bodovou známkou 4.

4.2.3 Varianta 3

Třetí koncept závěsu se skládá ze dvou háků přivařených na podélníku, pružného členu nasunutého na oba háky a drátu na tlumiči (obr. 4.3). Polotovarem háků je ocelový drát o průměru 12 mm. Pro větší styčnou plochu a lepší svařování je dosedací část háků k podélníku zploštěna. Každý z háků je k podélníku přivařen dvěma koutovými svary o délce 30 mm. Háky jsou zakončeny kuželovou hlavou a prstencem. Pružný člen vyrobený z EPDM pryže má tvar písmene V a je vybaven třemi oky. Krajními oky je nasazen na háky. Do prostředního oka je nasazen držák vedoucí od tlumiče. Ten je dvoudílný, vyrobený z ocelového drátu o průměru 10 mm zakončený hlavou a prstencem.



Obr. 4.3: Návrh konstrukce zadního závěsu – varianta 3 [1]

Tuhost závěsu

Tuhost konstrukčního řešení varianta 3 je ze všech navržených konceptů kvůli tvaru pružného členu nejnižší. Tuto skutečnost umocňuje absence těla k pružnému členu. Tuhost závěsu varianta 3 je podle tabulky 4.1 ohodnocena bodovou známkou 5.

Náročnost montáže

Ve srovnání s variantou 1 a 2 je montáž tohoto konceptu závěsu jednodušší. Není zde potřeba použití náradí, nárok na vyšší preciznost ani zvýšená pozornost pro správnou pozici pružného členu díky jeho symetrii. Přivaření drátů ke karoserii není v montáži závěsu zohledněno, protože je tento krok proveden při svařování karoserie na automatické svařovací lince. Čas potřebný k montáži závěsu varianta 3 byl stanoven na 29 s (tab. 4.7) a dle tabulky 4.3 byla doba montáže této varianty ohodnocena bodovou známkou 6.

Tab. 4.7: Přehled úkonů a potřebného času k montáži závěsu varianta 3 [1]

Úkon	Čas potřebný k provedení úkonu [s]
Nasunutí pružného členu na hák od karoserie	10
Nasunutí pružného členu na hák od karoserie	10
Nasazení držáku výfukové soustavy do oka pružného členu	9
Celkový čas	29

Opravitelnost

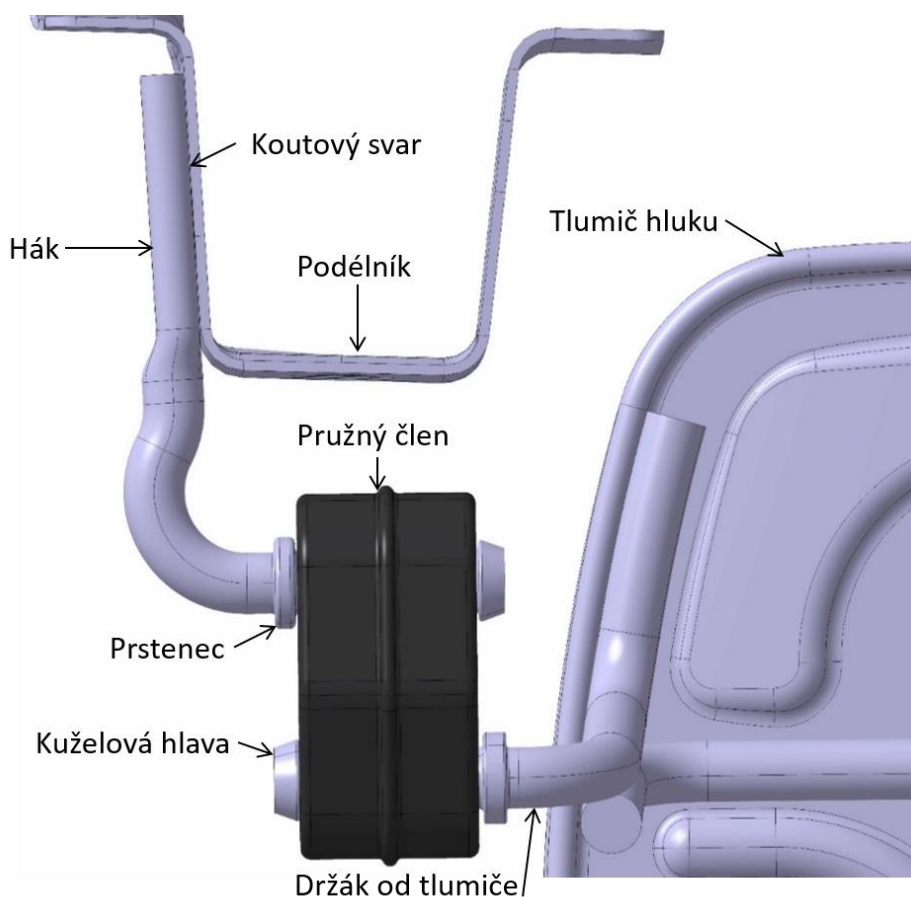
Ocelové háky přivařené k podélníku nabízejí vysokou spolehlivost, pravděpodobnost jejich poruchy je proto malá. Případná oprava prasklého drátu si žádá odstranění zbytku drátu a svaru od podélníku a přivaření nového drátu. Kvůli tomuto kroku je opravitelnost tohoto typu závěsu složitá. Výměna pružného členu po poruše je jednoduchá, sestávající se pouze z vysunutí pružného členu z háků a nasunutí nového. Opravitelnost tohoto typu závěsu je dle kapitoly 4.1.3 ohodnocena bodovou známkou 1 – komplikovaná oprava.

Cena

Cena tohoto konceptu se skládá ze sumy cen jednotlivých dílů. Montážní operace přivaření háků k podélníku není v ceně závěsu uvažována. Nasunutí pružného členu je zohledněno v kapitole náročnost montáže. Cena tohoto závěsu je podle tabulky 4.5 ohodnocena bodovou známkou 6.

4.2.4 Varianta 4

Čtvrtá varianta závěsu se skládá z jednoho háku přivařeného na podélník, pružného členu a z háku přivařeného k zadnímu tlumiči hluku (obr. 4.4). Hák přivařený na levý zadní podélník je podobný hákům varianty 3. Je vyroben z ocelového drátu o průměru 12 mm, v oblasti svaru je pro lepší kvalitu spoje zploštělý a poloha a délka části pro nasazení pružného členu jsou upraveny podle velikosti pružného členu. Hák je na podélník přivařen dvěma koutovými svary o délce 35 mm. Délka svaru byla zvolena na základě zkušeností a reference z podobného místa. Na hák je nasunut již existující pružný člen vyrobený z EPDM pryže používaný v sestavě jiného závěsu. Jeho tvar je odlišný od předchozích variant a byl vybrán na základě snahy o minimální cenu celého závěsu. Držák na tlumiči je podobný držáku varianty 3. Je také vyroben z ocelového drátu o průměru 10 mm, pouze část pro nasunutí pružného členu je přizpůsobena jeho tvaru.



Obr. 4.4: Návrh konstrukce zadního závěsu – varianta 4 [1]

Tuhost závěsu

Tuhost závěsu je dána pouze tvarem pružného členu, který nemá žádnou oporu v podobě těla závěsu. Při porovnání tvaru tohoto pružného členu s tvarem pružného členu například varianty 1 je zřejmé, že je jeho tuhost nižší kvůli méně robustnímu tvaru pružného členu. Tuhost závěsu varianta 4 je dle tabulky 4.1 ohodnocena bodovou známkou 6.

Náročnost montáže

Montáž tohoto typu závěsu v sériové výrobě je jednoduchá a rychlá, sestávající pouze z nasunutí háku a drátu do pružného členu. Jednoduchá manuální operace je ulehčena faktem, že pružný člen je symetrický a není jej nutno polohovat. Přivaření drátu ke karoserii není v této kapitole zohledněno, neboť je tento krok proveden při svařování karoserie. Čas potřebný k montáži závěsu varianta 4 byl stanoven na 19 s (tab. 4.8) a podle tabulky 4.3 byla tato varianta ohodnocena bodovou známkou 8.

Tab. 4.8: Přehled úkonů a potřebného času k montáži závěsu varianta 4 [1]

Úkon	Čas potřebný k provedení úkonu [s]
Nasunutí pružného členu na hák od karoserie	10
Nasazení držáku výfukové soustavy do oka pružného členu	9
Celkový čas	19

Opravitelnost

Opravitelnost tohoto typu závěsu je totožná s opravitelností varianty 3. Případná výměna pružného členu po poruše je jednoduchá. Komplikovaná je oprava porušeného háku na podélníku kvůli nutnosti karosářského zásahu. Pravděpodobnost jeho poruchy je však nízká. Opravitelnost závěsu varianta 4 je podle kapitoly 4.1.3 ohodnocena bodovou známkou 1 – komplikovaná oprava.

Cena

Celková cena tohoto závěsu je sumou cen háku, pružného členu a drátu na tlumiči. Při použití nutného minima levných dílů je tento koncept sestaven za účelem nejnížší možné ceny závěsu. Montážní operace nejsou v ceně závěsu uvažovány. Cena tohoto závěsu je ze všech navržených konceptů nejnížší a dle tabulky 4.5 je ohodnocena bodovou známkou 7.

4.3 Výběr konstrukčního řešení zadního závěsu

Výběr konkrétního konstrukčního řešení zadního závěsu proběhl za pomoci metody multikriteriálního rozhodování – Sattyho metody. Účelem této metody je výběr nejdůležitějšího parametru přidělením váhy podle jeho významnosti. Tento parametr bude hrát klíčovou roli při následujícím výběru konstrukčního řešení. Na základě zadaných okrajových podmínek je přiřazeno dvojicím parametrů bodové ohodnocení podle tabulky 4.9. Parametry: tuhost závěsu, montážní náročnost, opravitelnost a cena, jsou porovnány „každý s každým“, což je hlavní výhoda použití Sattyho metody. Následně je parametrům dopočítána váha vyjadřující jejich významnost. [13]

Tab. 4.9: Přehled pro bodové ohodnocení dvojic parametrů [13]

Počet bodů	Popis
1	Parametry jsou stejně významné
2	První parametr je slabě významnější než druhý
3	První parametr je dosti významnější než druhý
4	První parametr je prokazatelně významnější než druhý
5	První parametr je absolutně významnější než druhý

4.3.1 Zjištění vah jednotlivých parametrů – Sattyho metoda

Postup výpočtu vah pomocí Sattyho metody: [13]

1. Porovnání jednotlivých dvojic parametrů.
2. Udělení bodové známky parametrům podle tabulky 4.9.
3. Výpočet geometrického průměru podle vzorečku:

$$G(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdots x_n} = \left(\prod_{i=1}^n x_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4.1)$$

4. Výpočet normativní váhy (tab. 4.10) podle vzorečku:

$$V_i = \frac{G_i}{\sum_{i=1}^n G_i} \quad (4.2)$$

5. Zhodnocení vah a výběr nejvýznamnějšího parametru.

Tab. 4.10: Porovnání dvojic, přidělení bodové známky a výpočet vah parametrů [1]

Parametr	Tuhost závěsu	Montážní náročnost	Opravitelnost	Cena	Geometrický průměr	Normovaná váha
Tuhost závěsu	1	2	3	1/3	1,19	0,22
Montážní náročnost	1/2	1	4	1/5	0,80	0,15
Opravitelnost	1/3	1/4	1	1/5	0,36	0,07
Cena	3	5	5	1	2,94	0,56
Celkem					5,29	1

Po zhodnocení normovaných vah jednotlivých parametrů z tabulky 4.10 je zřejmé, že absolutně nejvýznamnějším parametrem při zadaných okrajových podmínkách je cena závěsu. Následuje tuhost závěsu, která má vliv na správnou funkci závěsu a životnost výfukové soustavy. Dále je montážní náročnost, která představuje náklady při montáži vozu. Opravitelnost závěsu je nejméně významný parametr.

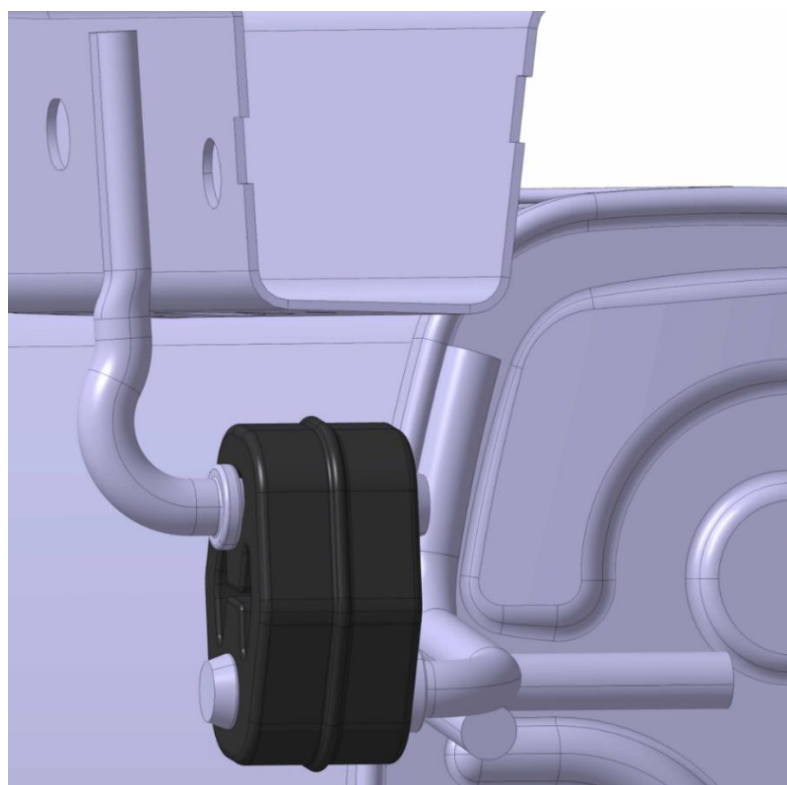
4.3.2 Výběr konstrukčního řešení závěsu

Při výběru konkrétního konstrukčního řešení závěsu zadní části výfuku pomohla přehledová tabulka 4.11. Nejprve byla každé kombinaci parametru s variantou přiřazena odpovídající bodová známka. Poté byly všechny body přiřazené variantám vynásobeny normovanou vahou příslušného parametru z tabulky 4.10. Následně byla provedena suma bodového hodnocení variant zatížených vahami parametrů. Vybrán byl závěs s nejvyšším bodovým ziskem. Výhodou tohoto způsobu vyhodnocení je komplexní porovnání všech variant závěsů při zohlednění všech hodnocených parametrů. Porovnány jsou všechny parametry, ne pouze ten s nejvyšší vahou.

Tab. 4.11: Přehledová tabulka výběru konstrukčního řešení závěsu [1]

Parametr	Normovaná váha parametru	Varianta 1		Varianta 2		Varianta 3		Varianta 4	
		Body	Body * váha	Body	Body * váha	Body	Body * váha	Body	Body * váha
Tuhost závěsu	0,22	10	2,20	10	2,20	5	1,10	6	1,32
Montážní náročnost	0,15	4	0,60	4	0,60	6	0,90	8	1,20
Opravitelnost	0,07	5	0,35	10	0,70	1	0,07	1	0,07
Cena	0,56	0	0,00	4	2,24	6	3,36	7	3,92
		Suma:	3,15	Suma:	5,74	Suma:	5,43	Suma:	6,51

V tabulce 4.11 byly porovnány sumy bodových ohodnocení jednotlivých variant ohodnocených vahou parametrů. Díky nejvyššímu bodovému zisku bylo vybráno konstrukční řešení závěsu označované jako **varianta 4** (obr. 4.5).



Obr. 4.5: Výběr konstrukčního řešení závěsu – varianta 4 [1]

5 Validace konstrukčního řešení

Správnost návrhu konstrukčního řešení závěsu zadní části výfuku bylo nutno ověřit validací. Validací je ověřena odolnost navrženého konstrukčního řešení závěsu vůči vzniku poruchy. Poruchou závěsů výfukové soustavy je prasknutí spojů, například svarů mezi drátem a některým z komponentů, či selhání některého z rozebíratelných spojů. Známé jsou také případy prasknutí komponentů závěsu například hliníkového těla, pružného členu či drátu.

Životnost automobilových komponentů je určena legislativou nebo výrobcem vozu. Předepisuje se zpravidla na určitý čas nebo kilometrový nájezd vozu. Za toto období nebo počet kilometrů v běžném provozu nesmí dojít k poruše komponentu. Od životnostních požadavků se také odvíjí zátěžové zkoušky jednotlivých komponentů. Závěsy výfukové soustavy jsou běžně validovány při určitém kilometrovém nájezdu vozu stanoveném výrobcem na předem určené testovací trati. Povrch trati a překážky přejížděny předepsanou rychlostí působí požadovaným a různorodým zatížením na komponenty. Životnost navrženého konstrukčního řešení v této diplomové práci byla vztažena ke dvěma normovaným zkouškám, a to zrychlené zkoušce simulující reálné podmínky provozu a zkoušce extrémního zatížení.

S nástupem moderní výpočetní techniky a přesných simulací došlo k rozšíření ověřování životnosti virtuálně. Pevnost komponentů a výběr konceptu je proto často prováděn pomocí simulace. Následný fyzický test pevnosti slouží jako verifikace správnosti výpočtu životnosti vybraného konstrukčního řešení. Hlavním přínosem ověřování životnosti virtuálně je snížení nutného počtu prototypů a fyzických testů, což přináší značné finanční úspory. Tento postup byl použit také pro validaci konstrukčního řešení závěsu zadní části výfukové soustavy navrženém v této diplomové práci.

Validace konstrukčního řešení závěsu zadní části výfuku v této diplomové práci byla provedena virtuálním zatížením závěsu silami působícími na závěs při reálné jízdě. Při jízdě na zkušebních tratích bylo změřeno zrychlení karoserie vozu a teploty na háku od tlumiče zadního závěsu. Z hodnot zrychlení karoserie byly díky známým charakteristikám tuhosti závěsů určeny pohyby výfukové soustavy a následně dopočítáno silové zatížení v zadním závěsu. Výpočtem byla ověřena pevnost samotného háku, svarů mezi hákem a podélníkem i samotného podélníku. Součástí validace bylo také zjištění dynamické obálky pohybů výfuku v zadní části vozu a zhodnocení jejího odstupu od okolní zástavby.

Postup validace navrženého konstrukčního řešení je následující:

1. Vytvoření modelu závěsu výfuku.
2. Příprava modelu závěsu výfuku pro pevnostní výpočty.
3. Naměření hodnot zrychlení karoserie vozu na testovacích okruzích.
4. Výpočet silového působení výfukové soustavy na hák zadního závěsu z naměřených hodnot zrychlení karoserie.
5. Zatížení háku silovým působením.
6. Výpočet pevnosti.
7. Vyhodnocení pevnosti.
8. Zjištění dynamické obálky pohybů a vyhodnocení.

5.1 Vstupy pro výpočet pevnosti závěsu

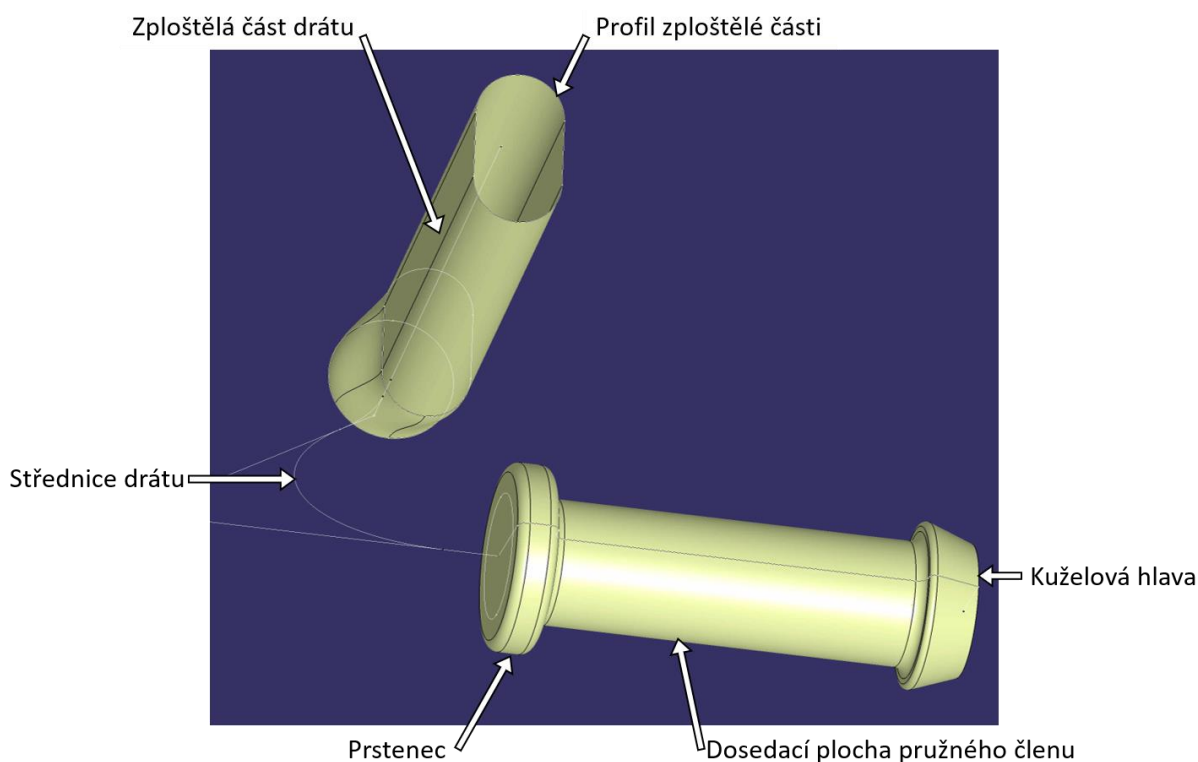
Prvním vstupem do výpočtu je 3D model navrženého konstrukčního řešení závěsu. Vytvořeny byly 3D modely háku závěsu a svarů. 3D modely podélníku, pružného členu a drátu na tlumiči byly převzaty již existující. Pro výpočet silového zatížení působícího v zadním závěsu výfukové soustavy byl použit již existující model výfukové soustavy.

Druhým vstupem do výpočtu pevnosti zadního závěsu byly hodnoty silového zatížení způsobeného pohyby výfukové soustavy, kterým byla zatížena dosedací plocha pro pružný člen na háku závěsu. Silové účinky byly dopočítány na základě simulace pohybů výfukové soustavy vybuzených pohyby karoserie. Vstupem pro tuto simulaci byly hodnoty zrychlení karoserie vozu naměřené při jízdě a naměřené charakteristiky dynamické tuhosti pružných členů závěsů.

5.1.1 Vytvoření modelu závěsu

Závěs zadní části výfuku se skládá z drátu ve tvaru háku přivařeného k levému zadnímu podélníku karoserie, pružného členu a drátu přivařeného na tlumič. Drát na tlumiči a pružný člen jsou již používané díly, proto jejich model již existuje a není v této práci vytvářen. Model háku na podélníku bylo nutno vytvořit, neboť se jedná o nový díl. Vytvořen byl také model svarů reálného tvaru s důrazem na reálný tvar na jejich koncích, což je nezbytné pro odpovídající výsledky pevnostních výpočtů.

Při modelování háku bylo třeba vytvořit typické prvky, které se na něm nacházejí. Jedná se především o zploštění drátu v místě jeho kontaktu s podélníkem, přechod ze zploštělé do kruhové části, zahnutí a vytvoření prstence s kuželovou hlavou. Odsazení prstence od kuželové hlavy je dáno tloušťkou pružného členu. Jako reference pro modelování přesného tvaru a rozměrů háku byla použita vzájemná poloha výfukové soustavy a podélníku a poloha horního oka pružného členu, které byly předem známy. Délka zploštělé části dosedající k podélníku je dána potřebnou délkou svaru a přidání přesahu drátu vůči svaru.



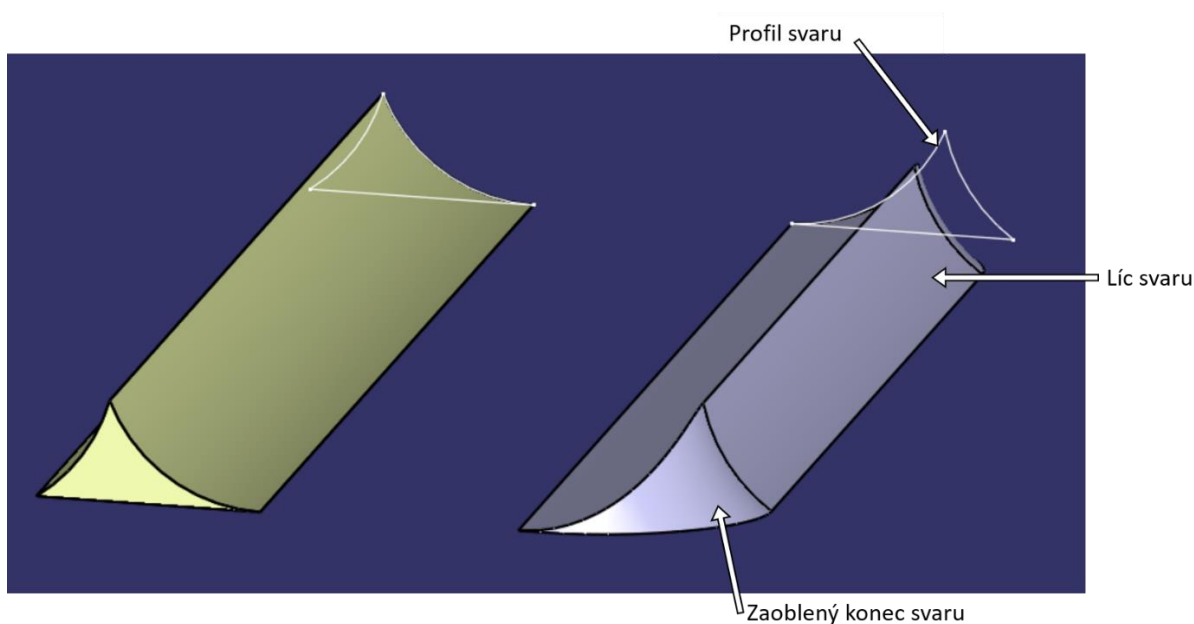
Obr. 5.1: Hák závěsu v průběhu modelování pomocí ploch [1]

Drát ve tvaru háku byl vymodelován v programu Catia V5 (obr. 5.1). Pomocí plošného modulu – Generative shape design byly vytvořeny okrajové plochy tělesa, které byly následně vyplněny objemem. Poté byla vytvořena také sestava závěsu. Postup modelování drátu byl následující:

1. Nahrání modelu podélníku a pružného členu v konečné poloze.
2. Zkopírování dosedací plochy drátu na podélníku pro referenci polohy a tvaru drátu.
3. Zkopírování osy oka pružného členu včetně bodů určujících šířku pružného členu pro referenci tvaru a polohy háku.
4. Náčrt střednice drátu v rovině procházející referenční osou drátu a kolmé k referenční dosedací ploše podélníku.

5. Náčrt průřezu zploštělé části drátu v rovině kolmé k ploše podélníku a vytvoření referenční úsečky o délce zploštělé části drátu na ploše podélníku.
6. Vytvoření okrajové plochy zploštělé části háku tažením náčrtu průřezu po úsečce a zaslepením konce drátu rovinnou plochou.
7. Náčrt kruhového průřezu v rovině odsazené od konce zploštělé části.
8. Vytvoření přechodové plochy mezi kruhovou a oválnou částí.
9. Náčrt profilu kuželové hlavy, dosedací plochy pro pružný člen a prstence v rovině procházející referenční osou oka pružného členu. Odsazení prstence a kuželové hlavy bylo určeno pomocí bodů znázorňujících šířku pružného členu.
10. Vytvoření dosedací plochy pro pružný člen rotací profilu okolo referenční osy.
11. Vytvoření plochy zahnutí háku tažením kruhového průřezu po připravené křivce.
12. Spojení všech okrajových ploch tělesa.
13. Vyplnění vnitřního prostoru okrajových ploch drátu objemem.

Tímto byl 3D model háku dokončen. Podobným způsobem jako model drátu byly vytvořeny také modely obou svarů (obr. 5.2). Profily svarů kopírují tvar drátu a plochy podélníku a líc svaru svým prohnutým tvarem odpovídá tvaru reálného svaru. Na základě prostudování tvaru konců reálných svarů podobných součástí na karoserii, vytvořených automatickým svařovacím robotem při sériové výrobě, byl vytvořen tvar konců virtuálních svarů odpovídající tvaru reálných svarů. Toto je nezbytné pro získání přesných výsledků odpovídající realitě.



Obr. 5.2: Svary v průběhu modelování pomocí ploch [1]

Postup modelování svarů byl následující:

1. Vytvoření referenční roviny pro náčrt profilu svaru kolmé k stěně podélníku a střednici drátu ve zploštělé části.
2. Promítnutí okrajové plochy drátu a podélníku do roviny náčrtu.
3. Dokončení náčrtu profilu svarů vytvořením náčrtu líce svaru.
4. Vytažení profilu svarů v požadované délce.
5. Uzavření koncových částí svarů plochou.
6. Spojení okrajových ploch svarů.
7. Vyplnění vnitřního prostoru okrajových ploch objemem.
8. Zaoblení konců svarů do požadovaného reálného tvaru.

5.1.2 Výpočet silových účinků v zadním závěsu a vykreslení dynamické obálky pohybů výfukové soustavy

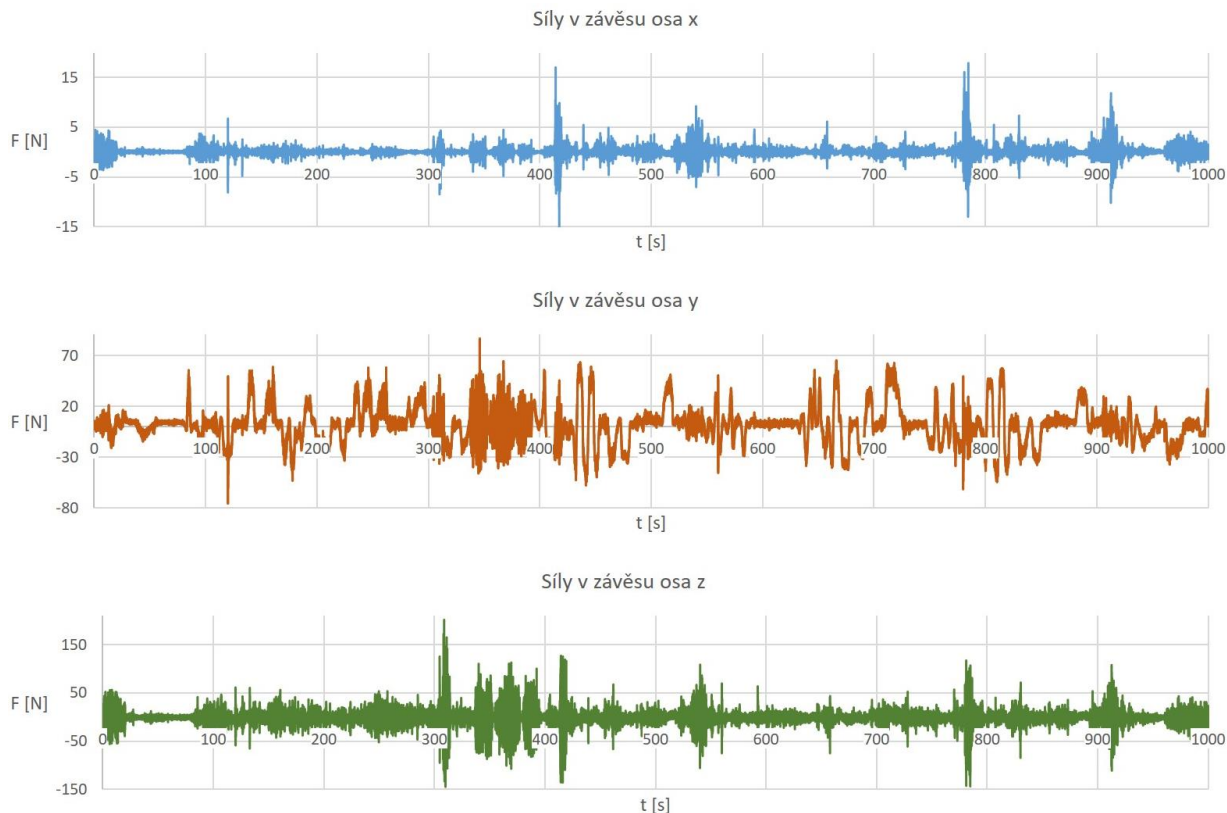
Měření a zpracování dynamické tuhosti pružných členů závěsů neprovedl autor práce, ale bylo realizováno u partnerského subjektu v akreditované laboratoři. Tento partnerský subjekt za přítomnosti autora práce provedl měření zrychlení karoserie vozu při jízdě na testovacích okruzích. Následný přepočet, filtraci a úpravu naměřených dat provedl také partnerský subjekt ve svém výpočetním středisku společně se simulací pohybů výfukové soustavy v oblasti koncovky výfuku a výpočtem silového působení v zadním závěsu výfuku. Autor práce obdržel zpracovaný signál silového zatížení působící v zadním závěsu výfukové soustavy při jízdě po obou testovacích okruzích, který použil při pevnostních výpočtech.

Ve výpočtu silového působení výfukové soustavy na hák zadního závěsu a simulaci pohybů výfukové soustavy buzených od pohybů karoserie vozu byly modely pružných členů pro zjednodušení nahrazeny virtuálními pružinami se stejnými charakteristikami tuhosti jako skutečné pružné členy. Proto byly nejprve změřeny hodnoty a charakteristiky dynamické tuhosti pružných členů závěsů výfuku ve všech osách prvního závěsu a v ose y a z druhého a třetího závěsu. [9]

Následně bylo změřeno zrychlení karoserie při jízdě na dvou testovacích okruzích. Dosažením předepsaného kilometrového nájezdu na těchto okruzích je provedena normovaná zkouška životnosti automobilových dílů. Základním předpokladem naměření odpovídajících dat je výběr správného vozu. Na pohyby výfukové soustavy má vliv celá řada parametrů, které

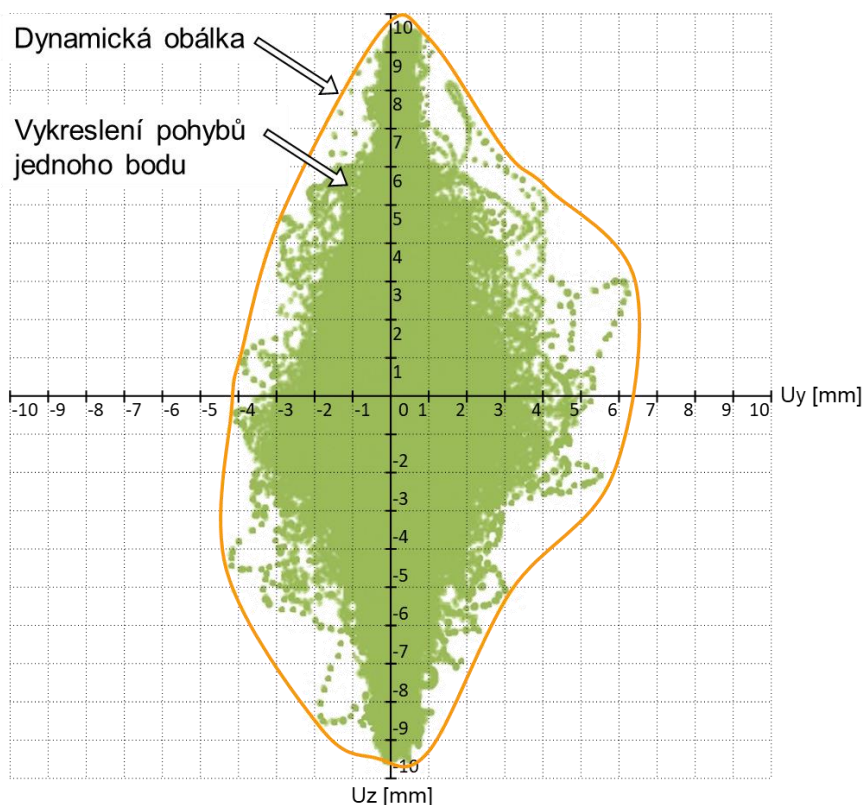
se mezi jednotlivými modely vozů výrazně liší. Jsou to především konstrukce karoserie, konstrukce a nastavení podvozku, rozměry a tlak v pneumatikách a celková hmotnost vozu. Karoserie byla pro měření osazena tříosými a jednoosými piezoelektrickými akcelerometry v kufru a na pravém předním podélníku a šestiosým snímačem pohybů v oblasti tunelu karoserie u zadních sedaček. Výstupem z měření je hodnota zrychlení karoserie na dvou různých testovacích okruzích. Z naměřených signálů zrychlení byly filtrací odstraněny složky o frekvenci vyšší než 50 Hz. Tyto vysokofrekvenční kmity nezpůsobují zatížení závěsů, ale projevují se jako zdroje hluku.

Model výfukové soustavy doplněný o materiály a hmotnosti jednotlivých komponentů byl vystaven působení pohybů karoserie vozu, které byly přes pružné členy transformovány na pohyby výfukové soustavy, způsobující svou hmotností silové účinky v závěsu. Pomocí simulace byl zjištěn průběh silového zatížení působícího na hák zadního závěsu výfukové soustavy v místě kontaktu s pružným členem ve všech osách (obr 5.3) pro obě tratě. Výstupem ze simulace je závislost mezi časem a velikostí síly v místě nasazení pružného členu na hák závěsu a simulace pohybů střednice koncovky výfuku. Tímto silovým působením byl zatížen model háku závěsu při pevnostním výpočtu.



Obr. 5.3: Průběh silových účinků v zadním závěsu výfuku v jednotlivých osách [1]

Vykreslení dynamické obálky pohybů výfukové soustavy v oblasti koncovky výfuku (obr. 5.4) proběhlo při simulaci pohybů výfukové soustavy za účelem zjištění maximálního výkmitu výfukové soustavy. Bodem vykreslujícím pohyby výfuku do roviny yz byl průnik osy koncovky výfuku s touto rovinou. Následným obtažením bodů pohybu křivkou byl vytvořen reálný tvar dynamické obálky pohybů výfuku. Při úvaze výfukové soustavy jako tuhého tělesa je tato dynamická obálka aplikovatelná na kterýkoliv bod vnější plochy zadní části výfuku.



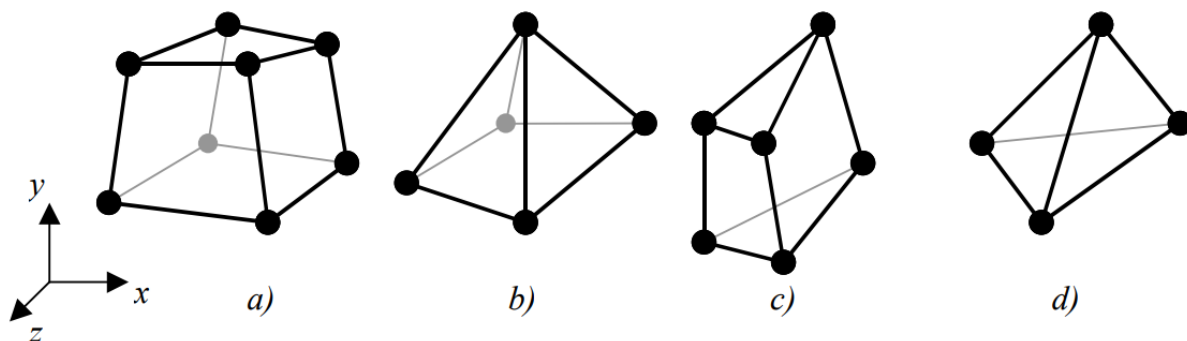
Obr. 5.4: Vykreslení dynamické obálky pohybů bodu okrajové plochy výfuku do roviny yz [1]

5.2 Výpočet pevnosti navrženého závěsu

Výpočet pevnosti navrženého závěsu zadní části výfuku byl řešen pomocí metody konečných prvků (dále MKP). Jedná se o numerickou metodu sloužící k řešení mnoha typů inženýrských úloh. Díky tomu je běžně používána v mnoha různých oborech především strojního inženýrství, například k simulaci průběhu napětí, deformace, elektromagnetických jevů, modální analýzy, přenosu tepla či proudění tekutin. Počátky MKP sahají do padesátých let minulého století, k jejímu velkému rozšíření však došlo až s nástupem výkonné moderní výpočetní techniky. Hlavním přínosem MKP při vývoji produktu je zkrácení vývojového času, snížení nákladů, snížení potřeby výroby fyzického prototypu, snížení počtu fyzických testů, zvýšení kvality výrobku a efektivity vývoje. [5]

5.2.1 Teorie metody konečných prvků

Podstatou MKP je rozdělení řešeného objektu na menší prvky s konečnými rozměry. Původní složitý tvar se nahradí jednoduššími prvky tvaru krychlí, či jehlanů, pokud se úloha řeší v 3D (obr. 5.5) nebo čtverci, či trojúhelníky, pokud se úloha řeší ve 2D. Tyto prvky jsou matematicky snadněji popsitelné. Rozdělením objektu na prvky vznikne tzv. síť, pro kterou je charakteristický počet a poloha uzlů. Čím vyšší je hustota sítě, tím přesnější je výsledek na úkor výpočetního času a náročnosti. Proto se hustší síť definuje zpravidla v kritických místech z pohledu tvaru součásti nebo zájmu zkoumání. [5]



Obr. 5.5: Příklady tvaru 3D elementů sítě [5]

Výpočet MKP je založen na Lagrangeově variačním principu, kde mezi všemi funkcemi, které zachovávají spojitost tělesa a splňují geometrické okrajové podmínky, se realizují ty, které udělají celkovou potenciální energii Π stacionární hodnotu. Jedná se o funkce napjatosti a deformace představující celkem 15 neznámých funkcí proměnných x, y, z . [5]

Potenciální energii tělesa Π lze vyjádřit vztahem:

$$\Pi = W - P \quad (5.1)$$

kde W je energie napjatosti tělesa Ω_t :

$$W = \frac{1}{2} \int_{\Omega_t} \sigma^T \cdot \varepsilon \cdot dV \quad (5.2)$$

a P je potenciál vnějšího zatížení:

$$P = \int_{\Omega_t} u^T \cdot o \cdot dV + \int_{\Gamma_P} u^T \cdot p \cdot dS \quad (5.3)$$

Ve vztazích (5.2) a (5.3) jsou uvedeny sloupcové matice:

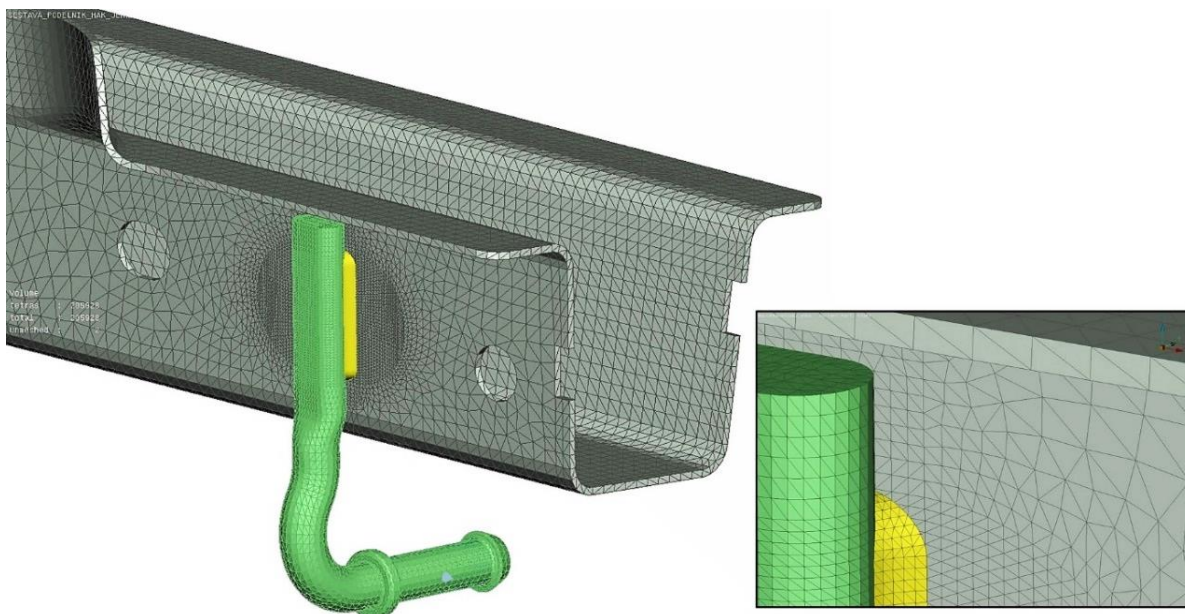
posuvů	$u^T = [u, v, w]$
přetvoření	$\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}]$
napětí	$\sigma^T = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}]$
objemového zatížení	$o = [o_x, o_y, o_z]$
plošného zatížení	$p = [p_x, p_y, p_z]$

5.2.2 Příprava modelů pro pevnostní výpočet

Před samotným výpočtem bylo třeba modely háku, svarů mezi hákem a podélníkem a podélníku připravit pro výpočet. Rozčleněním modelů na menší prvky byla vytvořena kvalitní síť a upraveny případné nedostatky v geometrii modelů pro hladký průběh výpočtu. Modely byly před výpočtem připraveny v programu ANSA (BETA CAE systems). Výhodou je podpora 3D dat ve formátu CATpart vytvořených v programu Catia, proto nemusí být modely vytvořeny přímo v programu ANSA. Příprava modelů probíhala jednotlivě a poté byly díly poskládány v sestavu.

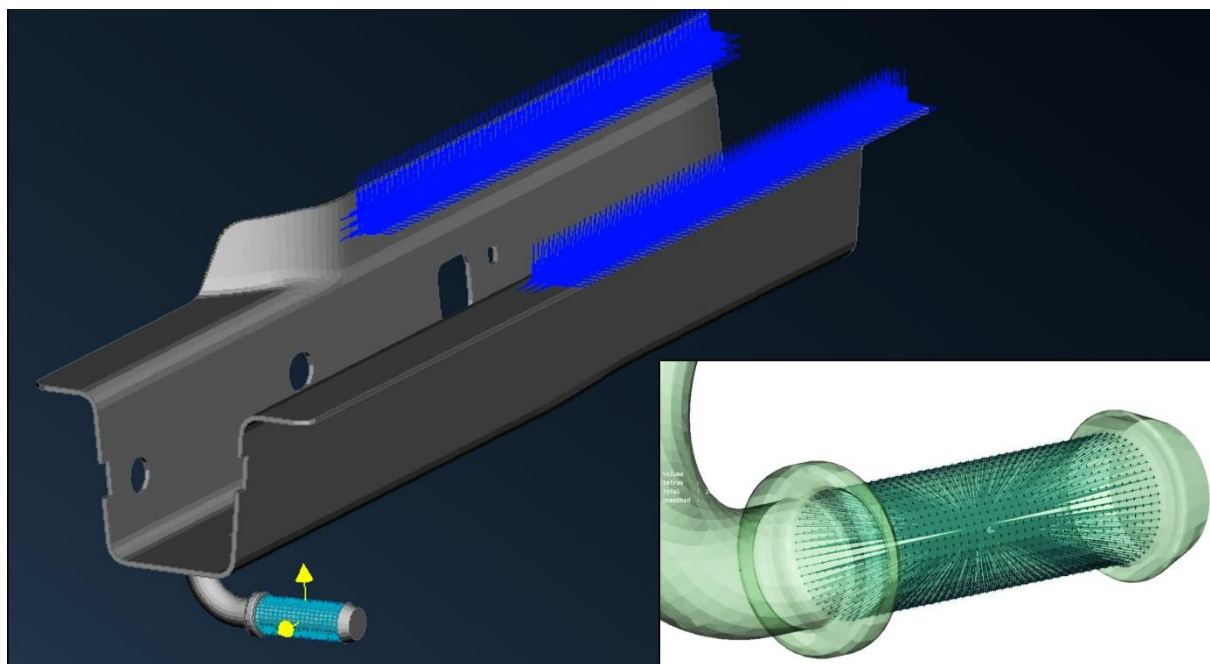
Postup přípravy byl následující:

1. Načtení modelů ve formátu CATpart do programu ANSA a nastavení základních vlastností jako jsou jednotky, rozlišení aj.
2. Kontrola geometrie modelů a případná oprava chyb na vnějších plochách. Tento krok je důležitý z důvodu prevence chyb při tvorbě sítě a výpočtu.
3. Tvorba sítě vnějších ploch dílů, tzv. mesh. Nejdůležitějším krokem celého výpočtu je tvorba kvalitní sítě. Pro dosažení odpovídajících výsledků je vytvořena nejjemnější a pravidelná síť v oblastech nejvyššího zájmu, tedy na svarech a na podélníku v oblasti svarů a na celém háku. Detailní pohled na hustotu sítě ukazuje obrázek 5.6. S ohledem na tvar těles probíhalo síťování u podélníku odlišně než u svarů a háku. U podélníku, jakožto výlisku z plechu, byla vytvořena střední plocha, která byla vysítována a té následně přiřazena odpovídající tloušťka. U háku a svarů byla vysítována vnější plocha, a vnitřní část byla poté vyplněna objemem.



Obr. 5.6: Síť jednotlivých těles a detail hustoty sítě [1]

4. Vytvoření sítě na kontaktních plochách svarů a háku se stejnými parametry jako síť sousedních dosedacích ploch.
5. Vytvoření sítě objemu tělesa.
6. Oproštění sítě od objemu u všech těles, smazání objemu a okrajových ploch těles.
7. Vytvoření sestavy těles a přiřazení materiálových vlastností modelům.
8. Nastavení interakce mezi podélníkem, svary a hákem byla vytvořena přidáním vazby mezi dosedacími plochami.
9. U podélníku bylo v místech jeho připojení ke zbytku karoserie aplikováno vetknutí (obr. 5.7).
10. Aplikace silového zatížení na hák závěsu (obr. 5.7). Ohniskem zatížení byl střed drátu, aplikací zatížení byla však celá dosedací plocha pro pružný člen.



Obr. 5.7: Aplikace silového zatížení na hák závěsu a vetknutí podélníku [1]

5.2.3 Výpočet pevnosti navrženého závěsu

Následujícím krokem bylo nastavení parametrů výpočtu a provedení samotného výpočtu. Rozhodujícím krokem správnosti výpočtu bylo nastavení správného počtu opakování silového signálu. Zrychlená zkouška simulující reálný provoz i zkouška extrémního zatížení mají předepsaný kilometrový nájezd, kterého je dosaženo jízdou po dvou různých testovacích okruzích, na kterých byl naměřen signál zrychlení karoserie. Délka signálu je trvání průjezdu jednoho okruhu. Proto bylo nastaveno příslušné opakování signálu k dosažení požadovaných výsledků. Postup výpočtů je následující:

1. Export výpočetního modelu z ANSY do softwaru ABAQUS, používaném pro analýzu úloh konečných prvků.
2. Rozdělení silového zatížení podle jednotlivých os. Výpočet proběhl pro každý směr separátně, vyhodnocení výsledků bylo dohromady. Úloha byla řešena jako statická se zatížením o proměnné amplitudě.
3. Nastavení počtu opakování působení silového zatížení, reflektující délku zkoušky simulující podmínky reálného provozu a zkoušky extrémního zatížení. Délka naměřeného signálu odpovídá projetí pouze jednoho testovacího okruhu. Signál zatížení zrychlené zkoušky simulující reálný provoz byl proto zopakován 3600x a signál zkoušky extrémního zatížení 576x.
4. Spuštění výpočtu.

6 Zhodnocení a doporučení

Posledním krokem zbývajícím ke konstatování správnosti navrženého konceptu je vyhodnocení výsledků výpočtů z předchozí kapitoly. Výsledky vnitřních silových účinků v závěsu jsou použity pro vyjádření bezpečnosti proti únavovému poškození navrženého zadního závěsu výfuku v oblasti navaření háku závěsu na podélník karoserie a samotného háku. Bezpečnost proti únavovému poškození je vyjádřena na základě materiálových vlastností bezpečnostním faktorem vztaženým k normované zrychlené zkoušce simulující podmínky reálného provozu a normované zkoušce extrémního zatížení. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tyto normované zkoušky běžně slouží k posouzení životnosti automobilových dílů. [9]

Nově navržené díly, tedy svary a hák a podélník v oblasti svarů, jsou vyhodnocovány samostatně, ačkoliv výpočet pevnosti proběhl na sestavě těchto dílů. Pružný člen a drát na tlumiči jakožto přebrané a dříve odzkoušené díly zde vyhodnoceny nejsou a jsou považovány za vyhovující. Velikost a rozmístění bezpečnostního indexu na jednotlivých komponentech bylo graficky znázorněno pomocí barevné stupnice. Pozornost byla zaměřena především na lokání koncentrace napětí, kde je index bezpečnosti nejmenší. Obecně lze považovat díl za bezpečný, pokud je bezpečnostní index dílu v kritickém místě vyšší než 1. Z důvodu odstranění vlivu nepřesností vnesených do výpočtu je běžnou praxí přidat bezpečnostní rezervu. Kvůli tomu budou díly považovány za bezpečné, pokud bude bezpečnostní index vyšší než 1,3. Byla stanovena bezpečnostní podmínka, že závěs je možno považovat za správně navržený a bezpečný k použití v reálném provozu v případě, že vyhoví zároveň u obou zkoušek.

Pevnostní výpočty, které proběhly v softwaru ABAQUS (kapitola 5.2.3), byly následně vyhodnoceny v softwaru FEMFAT. Jedná se o postprocesor běžně používaný v automobilovém průmyslu k analýze napětí, vyhodnocení životnosti, poškození a stanovení bezpečnostních faktorů u staticky i dynamicky namáhaných součástí na základě známé velikosti a průběhu zatížení a materiálových vlastností. Funkce použitá k vyhodnocení pevnosti navrženého konstrukčního řešení v tomto případě je stanovení bezpečnostního indexu součásti a znázornění jeho rozmístění pomocí barevné stupnice.

6.1 Vyhodnocení bezpečnosti závěsu varianta 4

Podrobná specifikace validované varianty 4 je uvedena v kapitole 4.2.4. Závěs byl podroben zrychlené zkoušce simulující reálný provoz a zkoušce extrémního zatížení. Na základě zatížení působícího na závěs při těchto zkouškách byl zjištěn minimální bezpečnostní index závěsu i jednotlivých částí a graficky jsou znázorněny rizikové oblasti. Po prostudování výsledků lze obecně konstatovat, že kritickým místem na všech dílech je oblast dolního konce svarů.

Minimální bezpečnostní indexy vyskytující se na jednotlivých dílech vyhovují stanovené podmínce bezpečnosti. Vysoký bezpečnostní index háku zaručuje jeho spolehlivost a nízkou pravděpodobnost realizace složité opravy. Na základě těchto výsledků je doporučena výroba prototypového vzorku a jeho fyzické testování. Při pozitivním výsledku fyzických testů je možno tento koncept zadního závěsu považovat za bezpečný pro nasazení na reálný vůz a uvedení do provozu. Detailní vyhodnocení jednotlivých dílů při obou zkouškách je popsáno v následujících kapitolách 6.1.1 a 6.1.2.

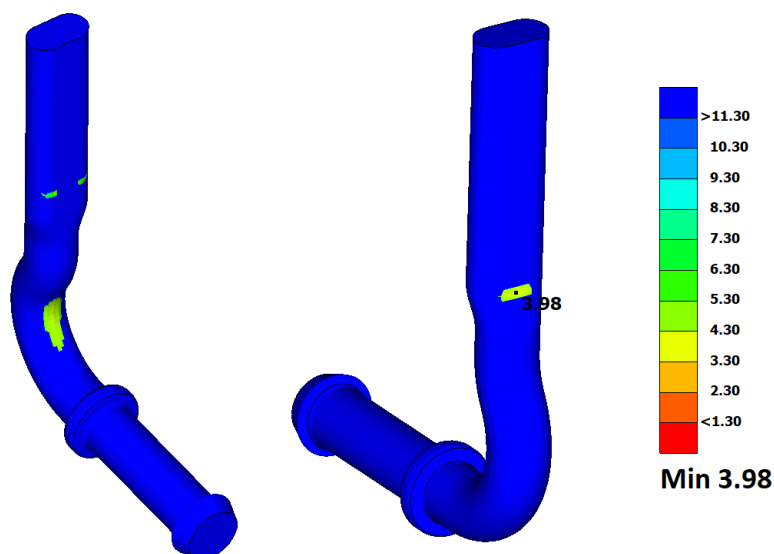
Následně bylo pro srovnání spočítáno, kolikrát je nutno zkoušky opakovat, aby došlo k porušení některého z dílů. Opakování obou zátěžových zkoušek bylo postupně navyšováno tak, aby byl index bezpečnosti menší než 1. Výsledkem bylo, že zkouška reálného provozu by se musela zopakovat 7,8x a zkouška extrémního zatížení 7,3x. Tyto výsledky dokazují dostatečnou životnost závěsu a vysokou spolehlivost svařovaného spoje nutnou pro podmínky trhu jeho nasazení.

6.1.1 Zrychlená zkouška simulující podmínky reálného provozu

Minimální bezpečnostní index navrženého konceptu závěsu při zrychlené zkoušce simulující reálný provoz (blíže popsána v kapitole 5.1.3) je 1,77. Navržená konstrukce závěsu této zkoušce vyhovuje, neboť je bezpečnostní index vyšší než 1,3. Rozmístění rizikových oblastí na jednotlivých dílech a zobrazení výskytu minimálního bezpečnostního indexu jsou následující:

Hák

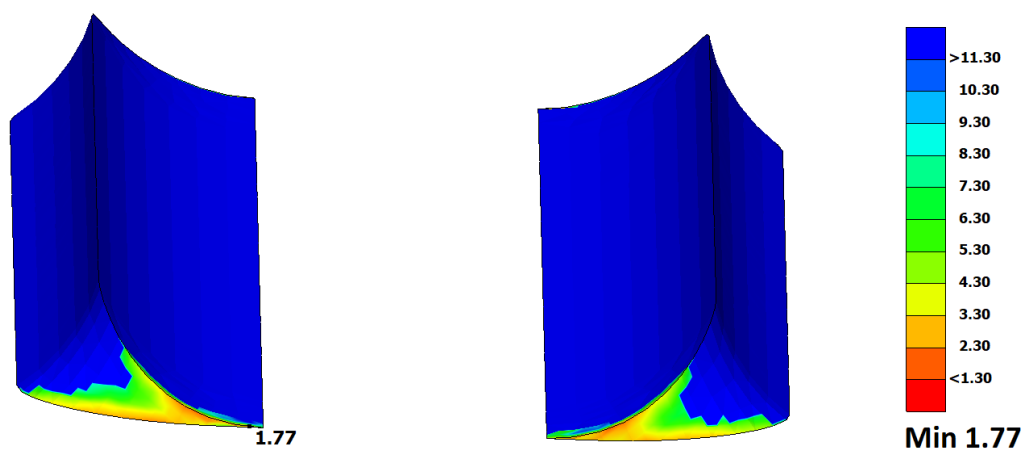
Minimální bezpečnostní index na háku při zrychlené zkoušce simulující reálný provoz je 3,98. Jedná se tedy o nejbezpečnější díl sestavy závěsu. Jakožto díl namáhaný na ohyb je výskyt rizikových oblastí s nižším bezpečnostním indexem prohnutí háku a na koncích svarů (obr 6.1), kde přirozeně dochází ke kumulaci napětí.



Obr. 6.1: Rizikové oblasti a minimální bezpečnostní index na háku při zrychlené zkoušce simulující reálný provoz [1]

Svary

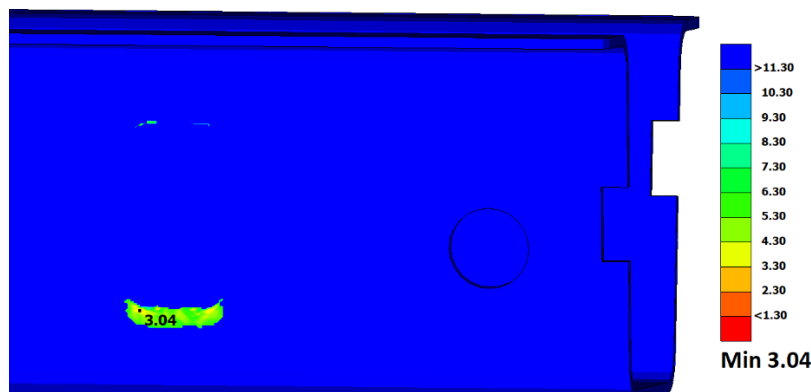
Svary jsou nejméně bezpečným dílem sestavy s indexem bezpečnosti 1,77. Kumulace napětí a oblast výskytu minimální hodnoty bezpečnostního indexu se nachází na konci svarů v místech přechodu materiálu mezi dílem a svarem (obr. 6.2).



Obr. 6.2: Rizikové oblasti a minimální bezpečnostní index na svarech při zrychlené zkoušce simulující reálný provoz [1]

Podélník

Výskyt rizikových oblastí na podélníku se nachází v oblastech konců svarů, a to především v okolí dolních konců svarů (obr. 6.3). Minimální bezpečnostní index má v tomto místě hodnotu 3,04.



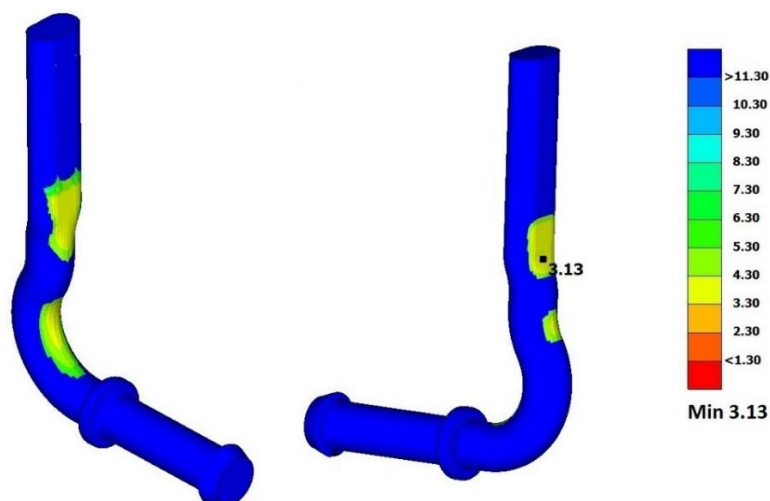
Obr. 6.3: Rizikové oblasti a minimální bezpečnostní index na podélníku při zrychlené zkoušce simulující reálný provoz [1]

6.1.2 Zkouška extrémního zatížení

Minimální bezpečnostní index navrženého konceptu závěsu při zkoušce extrémního zatížení (blíže popsána v kapitole 5.1.3) je 1,75 a stejně jako u zkoušky reálného provozu jsou kritickým dílem svary. Navržená konstrukce závěsu vyhovuje také této zkoušce, čímž závěs splňuje podmínku bezpečnosti. Zkouška extrémního zatížení způsobuje větší namáhání závěsu i přesto, že je výrazně kratší než zkouška reálného provozu. To dokazují také nižší hodnoty bezpečnostních indexů na všech dílech. Rozmístění rizikových oblastí je podobné jako u zkoušky reálného provozu a je následující:

Hák

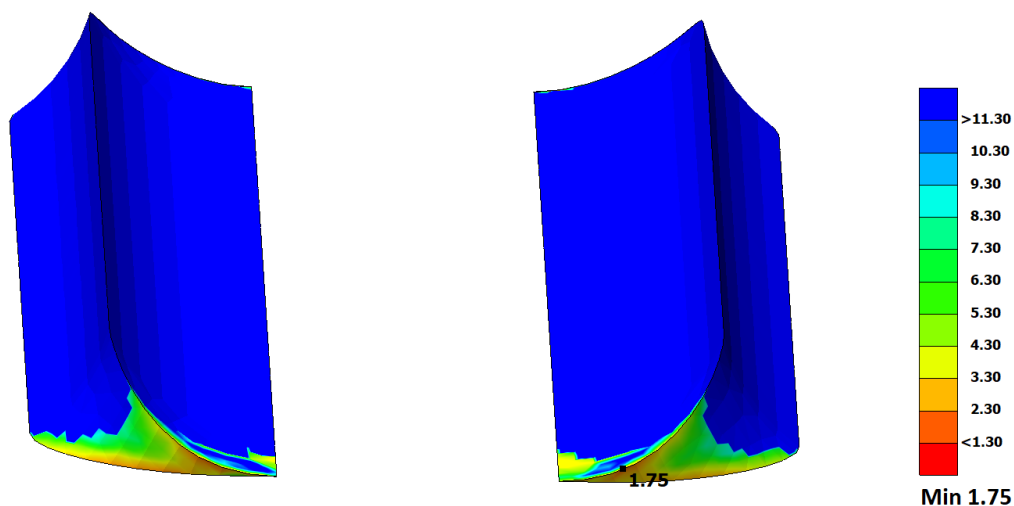
Hák je při zkoušce extrémního zatížení dílem s největším rozdílem minimálního bezpečnostního indexu ve srovnání se zkouškou reálného provozu. Rozmístění rizikových oblastí (obr. 6.4) je podobné jako u zkoušky reálného provozu, ale oblasti jsou větší. Minimální bezpečnostní index je 3,13.



Obr. 6.4: Rizikové oblasti a minimální bezpečnostní index na háku při zkoušce extrémního zatížení [1]

Svary

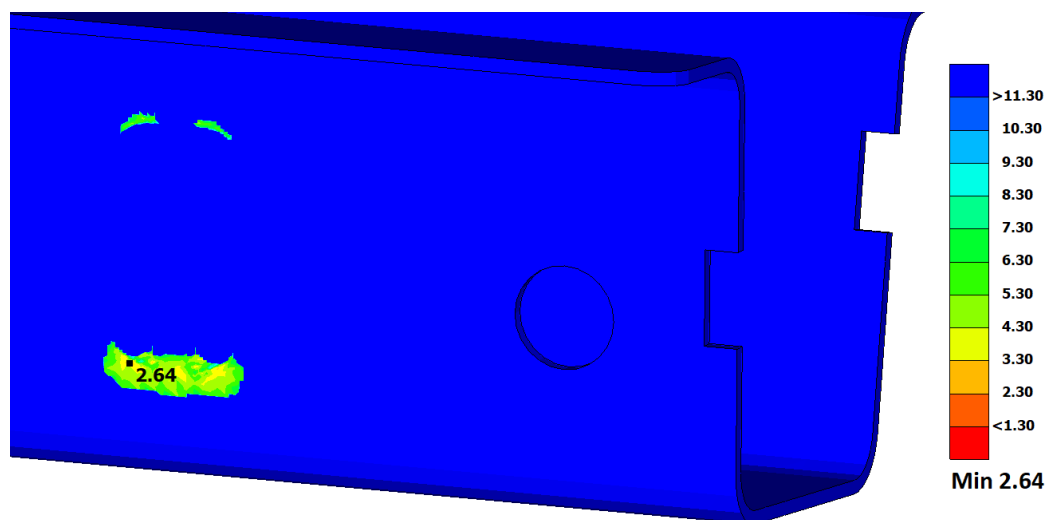
Rozmístění rizikových oblastí a velikost bezpečnostního indexu s hodnotou 1,75 (obr. 6.5) je velice podobné jako v předchozím případě. Stále platí, že rizikovou oblastí jsou konce svarů u kontaktu s hákem i podélníkem, kde z důvodu přítomnosti vrubu dochází ke koncentraci napětí.



Obr. 6.5: Rizikové oblasti a minimální bezpečnostní index na svarech při zkoušce extrémního zatížení [1]

Podélník

Stejně jako u svarů jsou i na podélníku rizikové oblasti mírně větší a bezpečnostní index s hodnotou 2,64 nižší (obr. 6.6) ve srovnání se zkouškou simulující podmínky reálného provozu.



Obr. 6.6: Rizikové oblasti a minimální bezpečnostní index na podélníku při zkoušce extrémního zatížení [1]

6.2 Vyhodnocení bezpečnosti závěsu se zkrácenými svary

Na základě pozitivních výsledků navrženého konceptu při obou zkouškách (kap. 6.1) přichází v úvahu možnost původní koncept upravit a více zjednodušit. Úprava sestává ze zkrácení svarů z původní délky 35 mm na 29 mm. Tato úprava přináší možnost úspory nákladů v podobě rychlejšího výrobního procesu díky kratšímu potřebnému času pro přivaření háku k podélníku a také použití kratšího háku. Varianta se zkrácenými svary byla validována stejně jako původní koncept, a to podrobením zrychlené zkoušce simulující reálný provoz a také zkoušce extrémního zatížení.

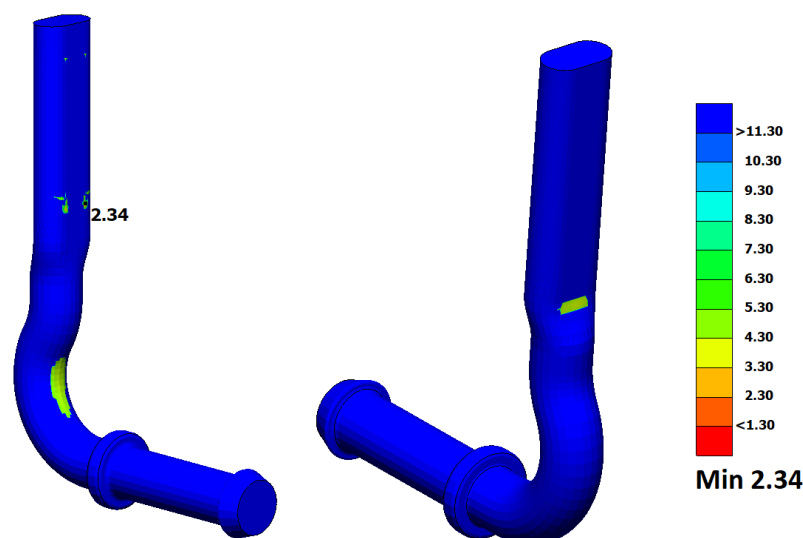
Výsledky konceptu závěsu varianty 4 se zkrácenými svary však nejsou tak příznivé, jako výsledky závěsu před úpravou. Přestože je bezpečnostní index při zrychlené zkoušce simulující reálný provoz vyšší než 1,3, při zkoušce extrémního zatížení nikoliv. U podélníku je dokonce nižší než 1. Upravený koncept nesplňuje danou podmínku bezpečnosti, proto nebude tento návrh uvažován pro použití na reálném voze. Rozmístění rizikových oblastí a bezpečnostní indexy jednotlivých součástí při obou zkouškách jsou detailně popsány v následujících kapitolách 6.2.1 a 6.2.2.

6.2.1 Zrychlená zkouška simulující reálný provoz

Závěs se zkrácenými svary byl vystaven stejnému zatížení při zrychlené zkoušce simulující reálný provoz jako koncept před úpravou. Minimální bezpečnostní index je 1,54. Je tedy nižší než u návrhu s delšími svary, pořád ale vyhovuje dostatečné bezpečnosti při této zkoušce. Paradoxem výsledků je fakt, že nižší hodnoty bezpečnostních indexů nemají zkrácené svary, nýbrž podélník. To je dáno především polohou konce svarů, která je zde dále od konce háku pro uchycení pružného členu a síla na konci háku způsobuje větší ohybový moment v oblasti svaru kvůli delšímu ramenu. Rozmístění rizikových oblastí a hodnoty bezpečnostních indexů na jednotlivých dílech závěsu jsou následující:

Hák

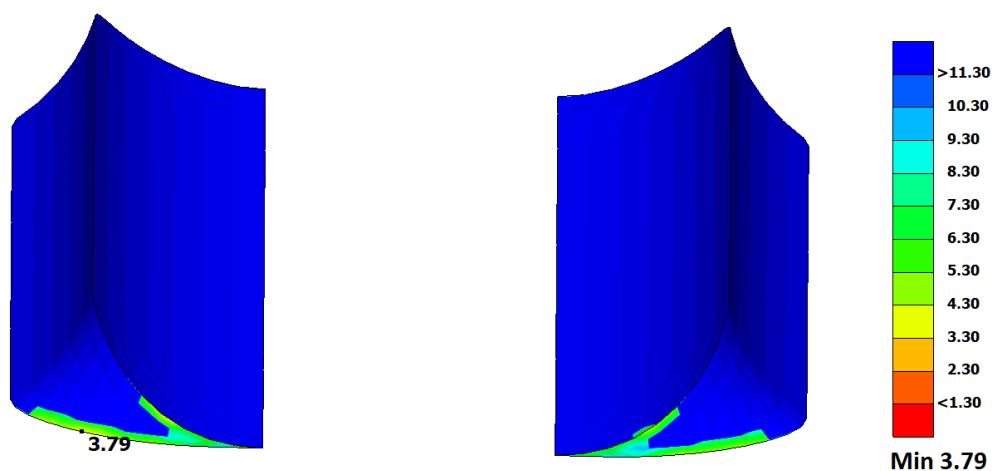
Rizikové oblasti na háku při zrychlené zkoušce simulující reálný provoz se závěsem se zkrácenými svary jsou velmi podobné variantě s původní délkou svarů. Výskyt minimálního bezpečnostního indexu, v tomto případě s hodnotou 2,34, se však nenachází na zadní části závěsu, nýbrž na straně v oblasti kontaktu konce svaru (obr. 6.7).



Obr. 6.7: Rizikové oblasti a minimální bezpečnostní index na háku po zkrácení svarů při zrychlené zkoušce simulující reálný provoz [1]

Svary

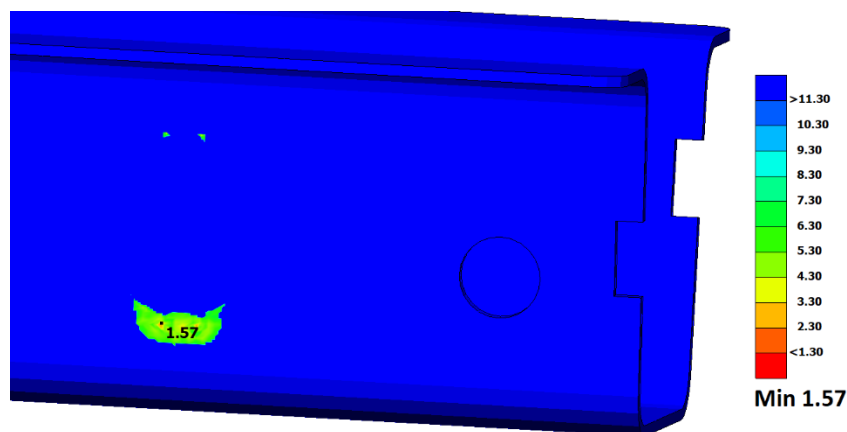
Minimální bezpečnostní index na zkrácených svarech má v porovnání s původními svary paradoxně vyšší hodnotu – 3,79 (obr. 6.8). Velikost rizikových oblastí je také v porovnání s původní délkou svarů (obr. 6.2) menší.



Obr. 6.8: Rizikové oblasti a minimální bezpečnostní index na zkrácených svarech při zrychlené zkoušce simulující reálný provoz [1]

Podélník

Rizikovou oblastí na podélníku je oblast kontaktu dolního konce svarů s podélníkem (obr. 6.9). Minimální bezpečnostní index v této oblasti je 1,54 a je nižší než u varianty s původní délkou svarů.



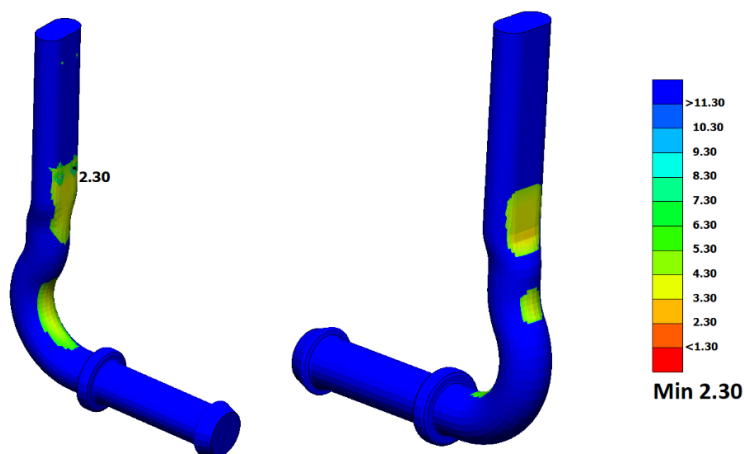
Obr. 6.9: Rizikové oblasti a minimální bezpečnostní index na podélníku po zkrácení svaru při zrychlené zkoušce simulující reálný provoz [1]

6.2.2 Zkouška extrémního zatížení

Závěs se zkrácenými svary byl vystaven také zkoušce extrémního zatížení stejně jako koncept před úpravou. Při této zkoušce však již závěs neobstál, neboť minimální hodnota bezpečnostního indexu je 0,97. Tímto závěs nesplňuje podmínku bezpečnosti, a proto s varianta se zkrácenými svary nebude uvažována pro nasazení do reálného provozu. Rozmístění rizikových oblastí a bezpečnostní indexy na jednotlivých částech závěsu jsou následující:

Hák

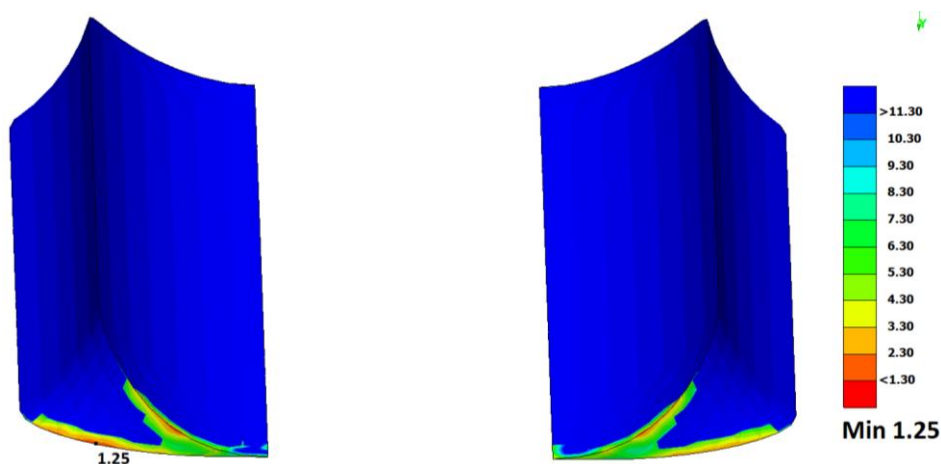
Při zkoušce extrémního zatížení je opět minimální hodnota bezpečnostního indexu 2,30 nižší a rizikové oblasti větší v porovnání se zkouškou reálného provozu (obr. 6.10). Minimální hodnota bezpečnostního indexu na háku se nachází opět v oblasti dolního konce svaru na straně svarů.



Obr. 6.10: Rizikové oblasti a minimální bezpečnostní index na háku po zkrácení svarů při zkoušce extrémního zatížení [1]

Svary

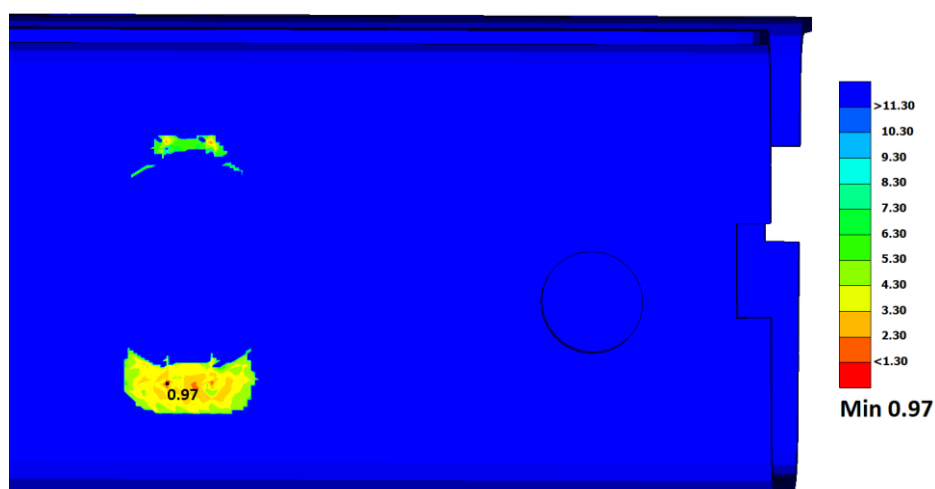
Zkrácené svary zkoušce extrémního zatížení vyhoví za předpokladu snížení bezpečnostní rezervy bezpečnostního indexu ze 30 % na 25 %. Touto úpravou okrajových podmínek by byl minimální bezpečnostní index 1,25 dostačující. Typicky se vyskytuje v dolní oblasti svaru na kraji v kontaktu s podélníkem (obr. 6.11).



Obr. 6.11: Rizikové oblasti a minimální bezpečnostní index na zkrácených svarech při zkoušce extrémního zatížení [1]

Podélník

V totožném místě jako na svarech se také na podélníku vyskytuje minimální bezpečnostní index (obr. 6.12). Tento index má však hodnotu již nižší než 1, proto podélník a celý závěs se zkrácenými svary zkoušce extrémního zatížení nevyhovuje.



Obr. 6.12: Rizikové oblasti a minimální bezpečnostní index na podélníku po zkrácení svarů při zkoušce extrémního zatížení [1]

6.3 Dynamická obálka

Dynamická obálka pohybů znázorňující maximální výkmit výfukové soustavy v oblasti zadního závěsu je vyobrazená na obrázku 5.5. Z obrázku je patrné, že amplitudy pohybů jsou větší ve směru osy z a maximální výkmit je přibližně ± 10 mm. Při výkmitu vzhůru se tlumič přibližuje ke stínícímu plechu, při pohybu dolů se výfukové potrubí přibližuje k zadní nápravnici. Odstup tlumiče od stínícího plechu a výfukového potrubí od nápravnice je však stanoven na 20 mm. Z toho vyplývá, že ani při maximálním výkmitu výfukové soustavy při dynamické jízdě nedojde ke kontaktu s některým z okolních komponentů. Tímto je potvrzena správnost výběru pružného členu z pohledu jeho tuhosti i konstrukce závěsu z pohledu maximální dynamické obálky výfukové soustavy.

6.4 Doporučení

Pevnostní výpočet konceptu zadního závěsu výfuku varianta 4 s délkou svarů 35 mm přinesl pozitivní výsledky. Bezpečnostní indexy zrychlené zkoušky simulující podmínky reálného provozu i zkoušky extrémního zatížení jsou vyšší než 1,3. Tímto je splněna podmínka bezpečnosti pro nasazení závěsu do provozu na reálném voze. Vysoký bezpečnostní index háku s hodnotou 3,13 zaručuje jeho spolehlivost a nízkou pravděpodobnost realizace složité opravy. Následným výpočtem byl také stanoven počet opakování obou zkoušek, než dojde k únavovému poškození závěsu. Bylo zjištěno, že zrychlenou zkoušku simulující reálný provoz je třeba opakovat 7,8x a zkoušku extrémního zatížení 7,3x. Pro ověření správnosti navržených svarů byly původní svary o délce 35 mm zkráceny na 29 mm. Závěs se zkrácenými svary již podmínku bezpečnosti nesplňuje. Tento výsledek dokazuje, že navržená délka svarů 35 mm je správná.

Simulace maximálního výkmitu zadní části výfuku při jízdě ověřila dostatečnou tuhost závěsu a vyvrátila možnost kolize výfukové soustavy s některým z okolních komponentů. Měření teploty na drátu od tlumiče v oblasti uložení pružného členu na drát dokázalo, že maximální teplota vyskytující se v tomto místě je vyhovující a nepřesahuje maximální přípustnou teplotu pro nasazení pružného členu z materiálu EPDM pryž.

Na základě pozitivních výsledků výpočtů je doporučena verifikace správnosti konstrukce závěsu provedením fyzické zkoušky reálného provozu a zkoušky extrémního zatížení s prototypem závěsu. Verifikace výsledků provedením reálných zkoušek odstraní nepřesnosti vnesené do výpočtů při zjednodušení modelů. Na základě pozitivního výsledku fyzických zkoušek bude definitivně potvrzena možnost nasazení závěsu do reálného provozu.

Závěr

V úvodní části této diplomové práce byl čtenář seznámen se skladbou moderní výfukové soustavy. Používané komponenty byly rozděleny do funkčních celků na komponenty sloužící k čištění a přeměně výfukových plynů, vedení výfukových plynů a tlumení hluku. Podrobně byla popsána konstrukce pevných držáků a pružných závěsů výfukové soustavy vycházející z konstrukce výfukové soustavy, namáhání působícího na závěsy a ze zástavbových možností podvozkové části vozu.

Následovala definice nároků kladených na závěsy a držáky výfukové soustavy a jejich vliv na konstrukci, místo nasazení a správnou funkci závěsů a držáků. Na základě znalosti konstrukce pevných držáků a pružných závěsů společně se znalostí nároků kladených na závěsy a držáky byla provedena analýza zavěšení výfukové soustavy na konkrétním voze. Analýza zavěšení byla provedena formou popisu každého závěsu a držáku. Bylo zdůvodněno nasazení konkrétních závěsů a uveden příklad alternativy závěsu na jiném voze.

Další částí práce byl návrh vlastního konstrukčního řešení zadního závěsu výfukové soustavy v oblasti zadního tlumiče hluku a koncovky výfuku. Byly definovány hodnocené parametry a představeny čtyři koncepty závěsu. Za pomoci multikriteriálního rozhodování byl vybrán koncept nejvíce odpovídající daným okrajovým podmínkám.

Práce pokračovala virtuální validací navrženého závěsu. Validace proběhla posouzením bezpečnosti závěsu vůči vzniku únavového poškození při normovaných životnostních zkouškách. Tyto zkoušky jsou odjety na předepsaných okruzích o předepsaném počtu kilometrů. Na základě naměřeného signálu zrychlení karoserie vozidla při jízdě na testovacích okruzích byly spočteny silové účinky v zadním závěsu. Pokračovalo se vytvořením výpočetního modelu závěsu a jeho přípravou pro výpočet pomocí metody konečných prvků. Poté byl virtuální model závěsu zatížen silovým působením a proveden samotný výpočet.

Výsledkem výpočtů bylo zjištění bezpečnostního indexu vztaženému ke dvěma zátěžovým zkouškám používaným k ověření životnosti automobilových dílů. Byla stanovena podmínka bezpečnosti říkající, že závěs je možno považovat za bezpečný, pokud vyhoví oběma životnostním zkouškám. Vyhodnoceny byly zvláště podélník v místě navaření háku, svary mezi podélníkem a hákem a samotný hák. Následně bylo výpočtem zjištěno, kolikrát by bylo třeba

obě zkoušky opakovat, aby došlo k poruše závěsu. Pozitivní výsledky výpočtů vzbudily otázku, zdali nejsou svary předimenzovány. Původně navržené svary byly proto zkráceny a výpočet zopakován. Tento koncept již podmínce bezpečnosti nevyhověl.

Byla tedy navržena konstrukce pružného závěsu zadní části výfuku vyhovující všem okrajovým podmínkám. Byl splněn hlavní požadavek, a to co nejvíce optimalizovat cenu závěsu. Pevnostním výpočtem byla ověřena bezpečnost jeho nasazení v reálném provozu. Navržený koncept byl doporučen k výrobě prototypového vzorku a fyzickému odjetí životnostních zkoušek, čímž se validace oprostí od vlivu nepřesností vnesených do výpočtu zjednodušováním při tvorbě virtuálního výpočetního modelu a samotného výpočtu.

Použité informační zdroje

- [1] Vlastní fotografie/tabulka
- [2] RAUSCHER, Jaroslav. Spalovací motory: Studijní opory [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://www.iae.fme.vutbr.cz/userfiles/ramik/files/Spalovaci%20motory%202005.pdf>
- [3] PULKRABEK, Willard W. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Upper saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1997. ISBN 978-01-35708-54-5.
- [4] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. Automobily: Příslušenství. 2. Brno, Wintrova 10, 62800: Avid, spol., 2008. ISBN 978-80-87143-08-7.
- [5] PETRUŠKA, Jindřich. MKP v inženýrských výpočtech [online]. In: . Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/images/opory/MKP%20v%20inzenyrskych%20vypoctech/RIV.pdf>
- [6] VAN BASSHUYSEN, Richard a Fred SCHÄFER. Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems, and Perspectives. USA: SAE International, 2004. ISBN 0-7680-1139-6.
- [7] BMW Exhaust System Hanger - Genuine BMW 18207590154. In: Znmperformance.com [online]. ZNM Performance [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <http://znmperformance.com/bmw-exhaust-system-hanger-genuine-bmw-18207590154/>
- [8] FAMFULÍK, Jan, Jana MÍKOVÁ a Radek KRZYŽANEK. Teorie údržby: Studijní materiály. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1509-1.
- [9] Interní materiály ŠKODA AUTO a.s.
- [10] HE, Jimin a Zhi-Fang FU. Modal Analysis. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 2001. ISBN 0-7506-5076-6.
- [11] T 16 Palivové soustavy zážehových motorů se vstřikováním paliva: TECHNOLOGIE OPRAV 1. Tznj.cz[online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: http://www.tznj.cz/uploads/ucebnice_top1/files/16.html
- [12] [Http://blog.greenflag.com](http://blog.greenflag.com). In: [Http://blog.greenflag.com](http://blog.greenflag.com): What diesel drivers need to know about their DPF [online]. 2014 [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: <http://blog.greenflag.com/2014/diesel-drivers-need-know-dpf/>
- [13] OLIVKOVÁ, Ivana. Manažerské rozhodování: Etapy rozhodovacích procesů II., Studijní materiály